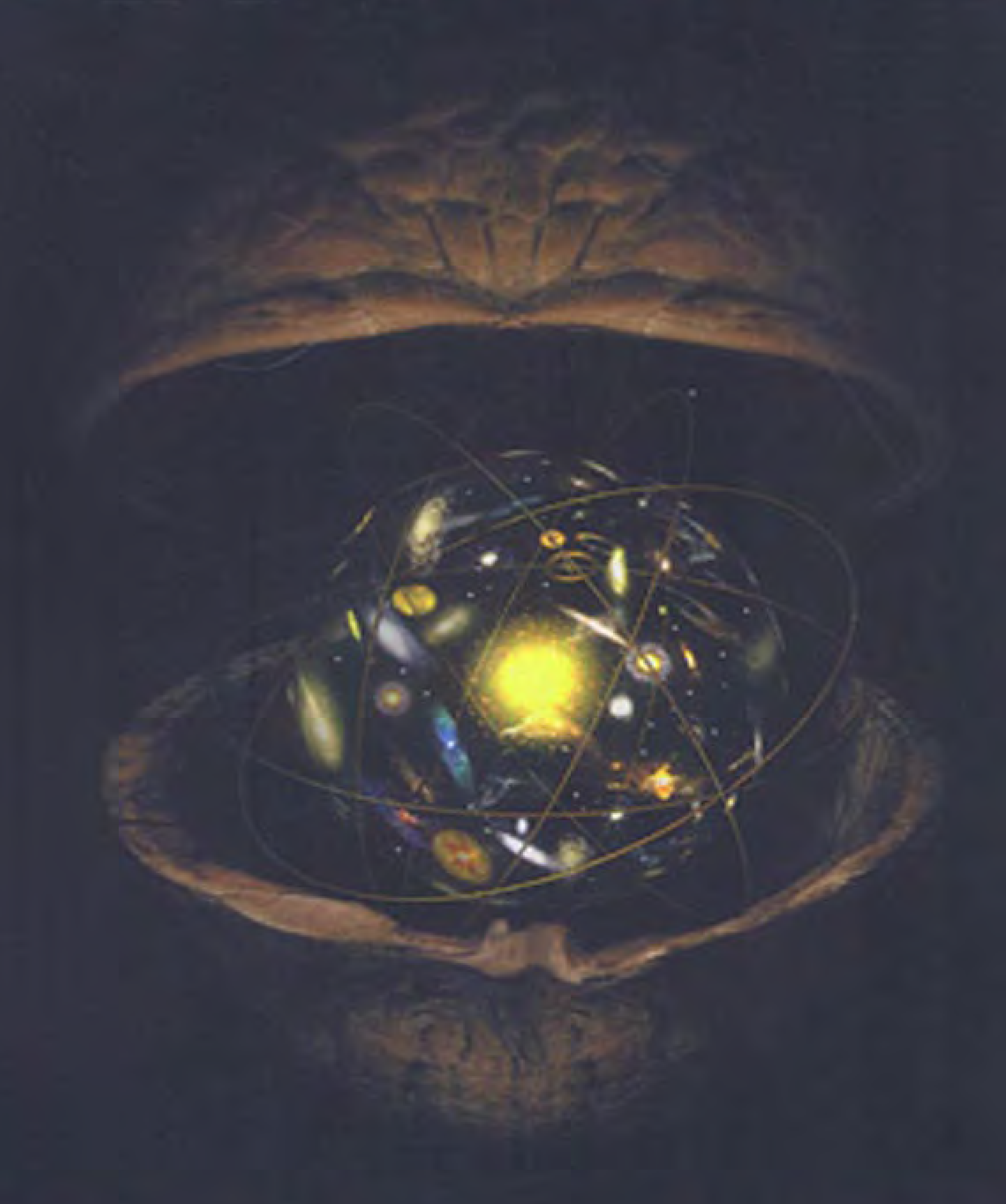
THE UNIVERSE IN A NUTSHELL

果壳中的宇宙



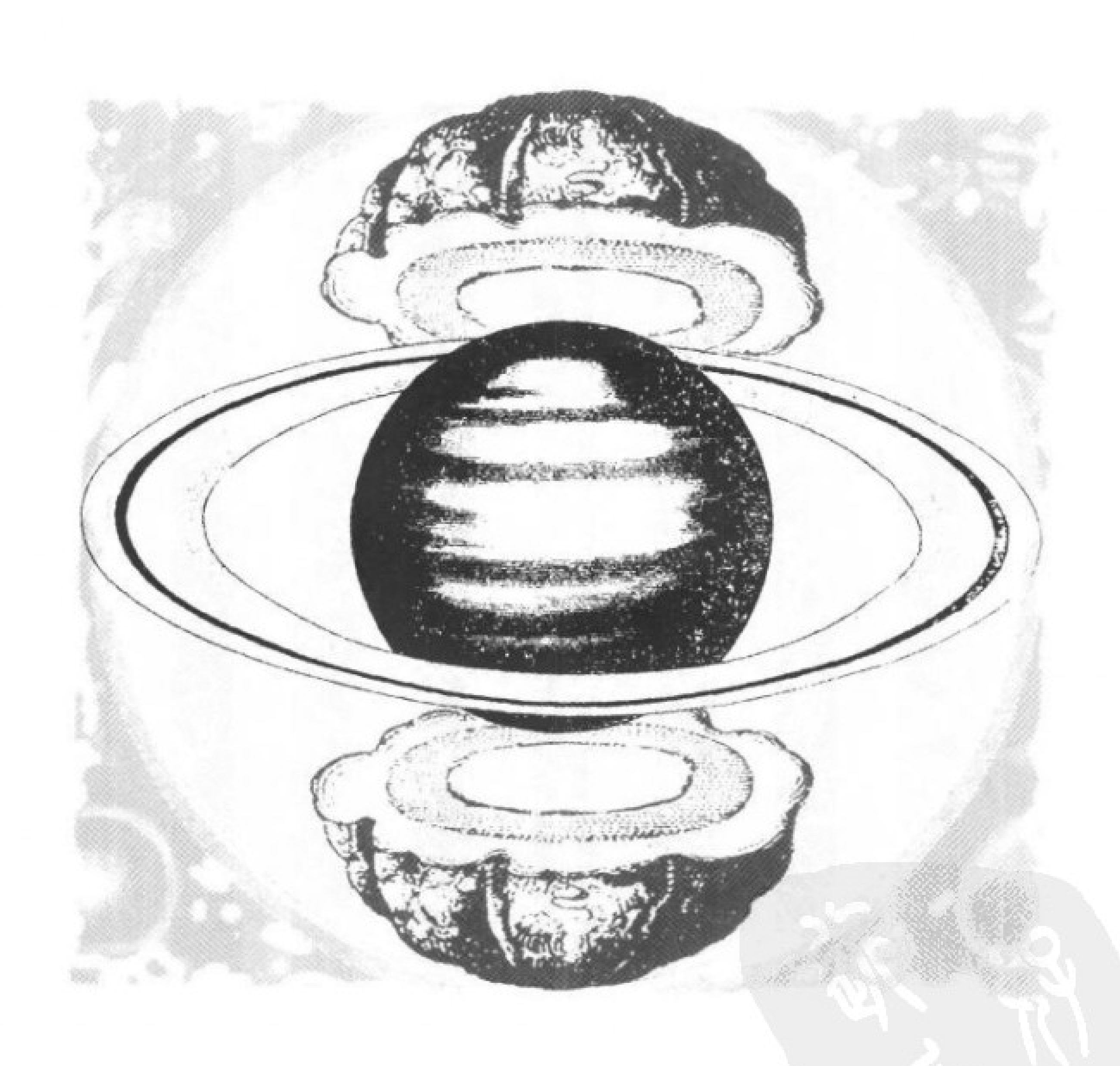
STEPHEN HAWKING

史蒂芬·霍金 / 著　吴忠超 / 译

湖南科学技术出版社

THE UNIVERSE IN A NUTSHELL

果壳中的宇宙



S T E P H E N H A W K I N G

史蒂芬·霍金/著　吴忠超/译

湖南科学技术出版社

果壳中的宇宙
著　　者：史蒂芬·霍金
译　　者：吴忠超
责任编辑：孙桂均
出版发行：湖南科学技术出版社
社　　址：长沙市湘雅路 280 号
http://www.hnstp.com
邮购联系：本社直销科　0731-4375808
印　　刷：深圳彩帝印刷实业有限公司
（印装质量问题请直接与本厂联系）
厂　　址：深圳市香蜜湖车公庙天安工业区 F3 栋 2 楼 CD 座
邮　　编：518048
经　　销：湖南省新华书店
出版日期：2002 年 2 月第 1 版第 1 次
开　　本：787mm × 1092mm　1/18
印　　张：11 $\frac{2}{3}$
字　　数：140000
书　　号：ISBN 7-5357-3359-X/N·100
定　　价：42.00 元



译 者 序

《果壳中的宇宙》这一书名出自于莎士比亚名剧《哈姆雷特》。它的隐喻是如此之重。哈姆雷特认为,即便把他关在果壳中,仍然自以为是无限空间之王。

哈姆雷特几百年前所吟唱的处境,却和人类的宇宙观完全相符。这当然要归功于莎士比亚敏锐的洞察力。在那个境界上艺术和科学是相通的。从广义上看,粒子、生命和星体的处境都和果壳相似,尚不清楚的是它们中有哪些自认为是无限空间之王。

现代量子宇宙学认为,整个宇宙是由一个果壳状的瞬子演化而来,果壳上的量子皱纹包含着宇宙中所有结构的密码。本书作者是这一学说的开创者。

史蒂芬·霍金,这位被禁锢在轮椅上近40年的最富有创见的科学巨人,一定比他的任何同类更深切地将这几行诗引为肺腑之言。否则的话,何以从卷帙浩繁的莎士比亚剧作中特地将其挑选出作为书名呢?可以断言,一切有志创造的人们都可以从他这部自《时间简史》以来最重要的著作中汲取灵感。

这本书将以包括英文、中文等十几种主要文字在全世界同步发行。译者在首次阅读其电子文本时,获得一种感觉,犹如在攀登高山一样,开阔的视野仿佛九叠画屏*般在眼前渐

* 李白在《庐山谣寄卢侍御虚舟》诗中写道:"庐山秀出南斗旁,屏风九叠云锦张,影落明湖青黛光。"九叠屏即李白书堂所在地。

次展开，而这个视野不是别的，正是科学的前沿。

我曾经请霍金为中文版写点什么。在此书印发前夕，他将对中国读者的寄语传给我，全文如下：

I would like to share my excitement at recent discoveries on black holes and cosmology with Chinese readers.

Professor Stephen Hawking, CH, CBE, FRS,
Lucasian Professor of Mathematics
University of Cambridge
19 th September 2001

庐山的如琴湖畔提供了当今已经非常稀罕的清静，使我在一个多月内得以专心译述。窗外云雾晴岚、朝晖夕霞瞬息变幻。奇峰异壑，飞瀑流泉间遍布着王羲之、慧远、陶潜、李白、白居易、苏轼和王阳明的遗迹，这一切予人以无限的想象空间。在这种氛围中思索宇宙是再惬意不过的了。

在此期间曾得到许多友人的帮助和支持。他们是杜欣欣、陈佳安和林岚。他们也是这份译稿的首批读者和批评者。志此纪念。

吴忠超

2001年7月15日记于庐山花径

2001年9月22日补记于望湖楼



史蒂芬·霍金给中国读者的寄语：

我愿意和中国读者分享对黑洞和宇宙学中最近发现的激动。

——史蒂芬·霍金

史蒂芬·霍金于2001年，Stewart Cohen 摄



前　　言

我从未预料到我的科普著作《时间简史》获得如此成功。它荣登伦敦《星期日时报》畅销书榜达四年之久，比任何一本书都长，尤其是对于一本不易读懂的科学书而言，更加令人印象深刻。随后，人们不断地询问我何时写一本续集。由于我不想写《简史之子》或者《时间的稍长历史》，也由于我忙于研究，所以没有顺从。但是，我已意识到，有必要撰写一本也许更易理解的有别于《时间简史》的书。《时间简史》是具有线性方式结构的书，其大多数章节在逻辑上依赖于前面的章节。这很符合一些读者的口味，但是有的读者在阅读时，一旦在前面章节停顿，就无缘领略后续的更激动人心的内容。相反地，本书的结构更像一棵树：第一章和第二章是主干，从主干上分支出其余各章。

分支的各章相互之间比较独立，在主干的两章之后可以随意选读。它们对应于我在《时间简史》出版之后研究或思索过的领域。这样，它们呈现了当代研究的某些最活跃领域的图像。在每一章中我也尽力避免单独的线性结构。如同1996年出版的《时间简史》插图本，本书插图及其说明形成了正文之外的另一个脉络，而且框中文字或者边注，将给读者提供深入了解某些课题的机会，这单靠正文是无法做到的。

当1988年《时间简史》初版时，万物的终极理论似乎已经在望了。从那时开始情形发生了什么变化呢？我们是否更接近目标？正如在本书将要描述的，从那时到现在我们又走了很长的路。但是，这仍然是一条蜿蜒的路途，而且其终点仍未在

望。正如古老谚语所说的，充满希望的旅途胜过终点的到达。我们追求发现，不仅是在科学中，而且是在所有领域中激起创造性。如果我们已经抵达终点，则人类精神将枯萎死亡。但我认为，我们将永远不会停止，我们若不更加深邃，定将更加复杂。我们将永远处于可能性的膨胀的视界之中心。

我愿意将我对正在进行的发现，以及正在涌现的实在的图像之激情和大家分享。因为情感上的直接我更专注于自己研究的领域。这研究的细节是非常技术性的，但是我坚信不需要数学理论即可以传达其广阔的观念。但愿我能成功。

我在撰写此书时得到了大量帮助。托玛斯·赫托格和尼尔·席尔勒帮助我作图、撰写说明和框中文字；安·哈里斯和吉蒂·佛古逊为我编辑手稿(或者更准确地讲，应为电脑文件。因为我所写的一切都是电子的)；还有书籍实验室和奔月设计公司的菲利普·丹创作了插图。此外，我要感谢所有让我能过上相当正常生活并从事科学研究的人们。没有他们此书便不能问世。

史蒂芬·霍金

2001年5月2日　剑桥



前　言

我从未预料到我的科普著作《时间简史》获得如此成功。它荣登伦敦《星期日时报》畅销书榜达四年之久，比任何一本书都长，尤其是对于一本不易读懂的科学书而言，更加令人印象深刻。随后，人们不断地询问我何时写一本续集。由于我不想写《简史之子》或者《时间的稍长历史》，也由于我忙于研究，所以没有顺从。但是，我已意识到，有必要撰写一本也许更易理解的有别于《时间简史》的书。《时间简史》是具有线性方式结构的书，其大多数章节在逻辑上依赖于前面的章节。这很符合一些读者的口味，但是有的读者在阅读时，一旦在前面章节停顿，就无缘领略后续的更激动人心的内容。相反地，本书的结构更像一棵树：第一章和第二章是主干，从主干上分支出其余各章。

分支的各章相互之间比较独立，在主干的两章之后可以随意选读。它们对应于我在《时间简史》出版之后研究或思索过的领域。这样，它们呈现了当代研究的某些最活跃领域的图像。在每一章中我也尽力避免单独的线性结构。如同1996年出版的《时间简史》插图本，本书插图及其说明形成了正文之外的另一个脉络，而且框中文字或者边注，将给读者提供深入了解某些课题的机会，这单靠正文是无法做到的。

当1988年《时间简史》初版时，万物的终极理论似乎已经在望了。从那时开始情形发生了什么变化呢？我们是否更接近目标？正如在本书将要描述的，从那时到现在我们又走了很长的路。但是，这仍然是一条蜿蜒的路途，而且其终点仍未在

望。正如古老谚语所说的，充满希望的旅途胜过终点的到达。我们追求发现，不仅是在科学中，而且是在所有领域中激起创造性。如果我们已经抵达终点，则人类精神将枯萎死亡。但我认为，我们将永远不会停止，我们若不更加深邃，定将更加复杂。我们将永远处于可能性的膨胀的视界之中心。

我愿意将我对正在进行的发现，以及正在涌现的实在的图像之激情和大家分享。因为情感上的直接我更专注于自己研究的领域。这研究的细节是非常技术性的，但是我坚信不需要数学理论即可以传达其广阔的观念。但愿我能成功。

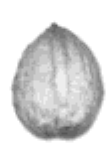
我在撰写此书时得到了大量帮助。托玛斯·赫托格和尼尔·席尔勒帮助我作图、撰写说明和框中文字；安·哈里斯和吉蒂·佛古逊为我编辑手稿(或者更准确地讲，应为电脑文件。因为我所写的一切都是电子的)；还有书籍实验室和奔月设计公司的菲利普·丹创作了插图。此外，我要感谢所有让我能过上相当正常生活并从事科学研究的人们。没有他们此书便不能问世。

史蒂芬·霍金

2001年5月2日 剑桥

C O N T E N T S

目　录



量子力学

M－理论

广义相对论

10－维膜

F－膜

超弦

11－维超引力

黑洞



第一章
相对论简史

爱因斯坦是如何为 20 世纪两个基本理论，即相对论和量子论奠基的



A. Einstein

阿尔伯特·爱因斯坦，这位狭义和广义相对论的发现者，1879 年诞生于德国的乌尔姆。次年他的全家即迁往慕尼黑。在那里他的父亲赫曼和叔父雅各伯建立了一个小型的不很成功的电器公司。阿尔伯特并非神童，但是宣称他在学校中成绩劣等似乎又言过其辞。1894 年他父亲的公司倒闭，全家又迁往意大利的米兰。他的父母决定让他留在慕尼黑，以便完成中学学业，但是他讨厌其独裁主义，几个月后离开了，前往意大利与家人团聚。后来他在苏黎世完成了学业，于 1900 年从著名的称为 ETH 的联邦高等工业学校毕业。ETH 的教授们不喜欢他好辩的性格以及对权威的蔑视，他们中无人愿意雇他为助手，而这恰恰是进入学术生涯的正常途径。两年之后，他终于在伯尔尼的瑞士专利局获得一个低级职位。1905 年正式在专利局上任，他写了三篇论文。这三篇论文不仅奠定了他作为世界最主要科学家之一的地位，而且开启了两项观念革命，这革命改变了我们对时间、空间以及实在本身的理解。

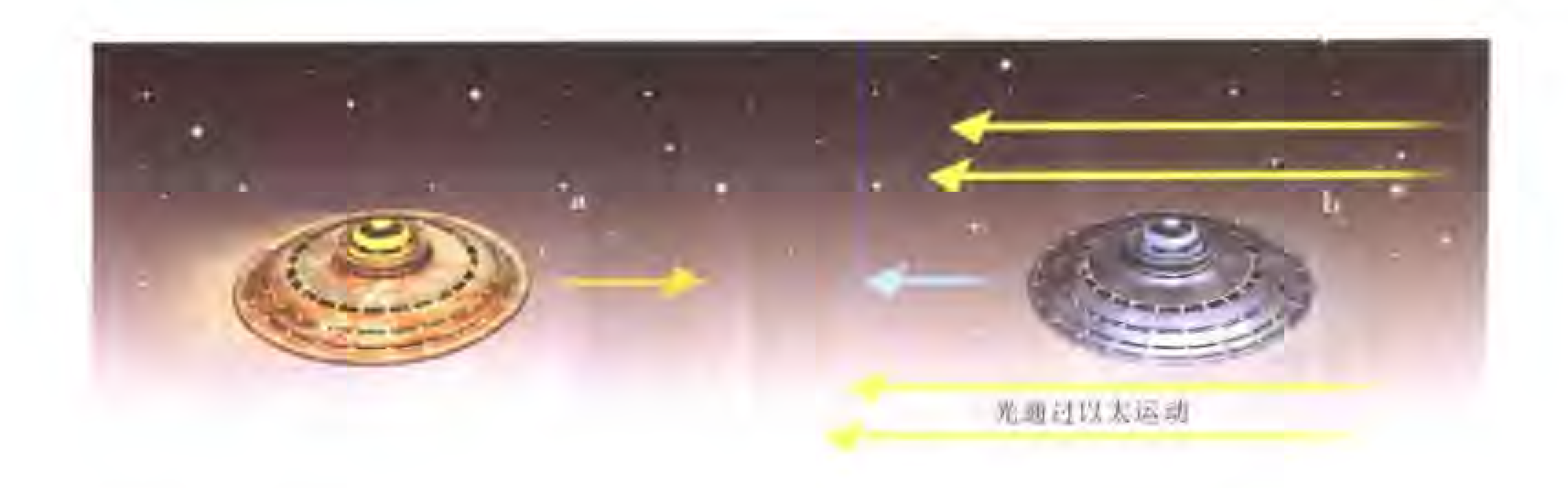
在 19 世纪末，科学家们相信他们已经处于完整描述宇宙的前夕。他们想象空间充满了所谓“以太”的连续介质。光线和无线电讯号是在以太中的波动，如同声音为空气中的压力波一样。对于完整理论所需要的一切只不过是要仔细测量以太的弹性性质。事实上，为了进行这种测量，哈佛大学建立了杰弗逊实验室。整个建筑物不用任何铁钉，以免干扰灵敏的磁测量。然而策划者忘记了构筑实验室和哈佛大部分楼房的褐红色砖头含有大量的铁。这座建筑迄今仍在使用，虽然哈佛仍然不清楚，不用铁钉的图书馆地板究竟可以支撑多少卷藏书。

到了世纪交替之际，开始出现了和穿透一切以太的观



Albert Einstein™

阿尔伯特·爱因斯坦于1920年。



上图 1.1
固定以太理论

如果光是在一种称为以太的弹性物质中的波，则在向它运动来的航天飞船上的某人(**a**)看来光速变得更高，而在与光同方向运动的航天飞船上的某人(**b**)看来光速变得更低

对面图 1.2
在地球公转方向和与它相垂直的方向的光速之间找不到任何差别。

念偏差。人们预料光在通过以太时以恒定的速率旅行；但如果你通过以太顺着光的方向运动，光的速度会显得更慢，而如果你逆着光的方向运动，它的速度会显得更快(图 1.1)。

然而一系列实验不支持这个观念。阿尔伯特·麦克尔逊和爱德华·莫雷于 1887 年在俄亥俄的克里夫兰的凯思应用科学学校所进行的实验为其中最为仔细最为精确者。他们对相互垂直的两束光的速度进行比较。随着地球绕轴自转以及绕日公转，仪器以变化的速率和方向通过以太运动(图 1.2)。但是麦克尔逊和莫雷在两光束之间没有找到周日或周年的差别。不管人们在哪个方向上多快地运动，光似乎总是以相同的速率相对于它的所在地运动(图 1.3)。

爱尔兰的物理学家乔治·费兹杰拉德和荷兰的物理学家亨得利克·洛伦兹，在麦克尔逊－莫雷实验的基础上建议，物体在通过以太运动时会收缩，而且钟表要变慢。这种收缩和钟表变慢使人们测量到相同的光速，而不管他们如何相对于以太运动（费兹杰拉德和洛伦兹仍然把以太认为是实在的物质）。然而，爱因斯坦在 1905 年 6 月撰写的一篇论文中指出，如果人们不能检测出他是否穿越空间的运动，则以太观念纯属多余。相反地，他以科学定律对于所有自由运动的观察者都显得相同的假设为出发



地球自西往东自转

光和地球围绕太阳公转轨道夹一直角

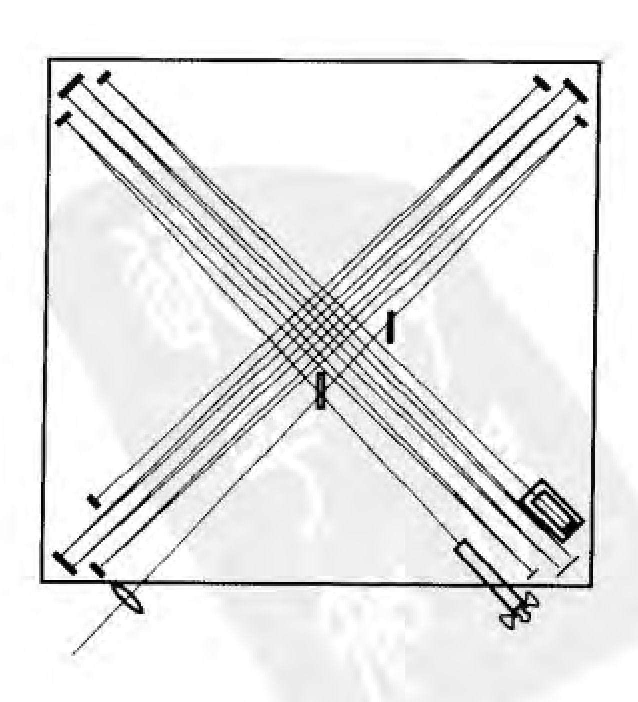
随着地球自转相互夹直角的光束之间也没有显示出光速的差异



图 1.3　测量光速

在麦克尔逊－莫雷干涉仪中，从一个光源发出的光被一面半镀银的镜子分成两束。这两束光在相互夹直角的方向上旅行，然后让它们再射到该半镀银镜面上而合并成一束。在这两个方向上光速的差异意味着一束光的波峰和另一束光的波谷可同时到达并且相互抵消。

右图：刊登于1887年《科学美国人》的该实验的示意图。





在向西飞行的飞机上的钟表比它在相反方向上飞行的同样的钟表记录了更多的时间。

从东向西飞行

在向东飞行的飞机上的旅客度过的时间比在向西飞行的飞机上的旅客少。

从西向东飞行

点。特别是，不管他们如何快速运动，都应测量到相同的光速。光速和他们的运动无关，并且在所有方向上都相同。

这就需要抛弃一个观念，即存在一个所有钟表都测量的称为时间的普适的量。相反地，每个人都有他或她自己个人的时间。如果两个人处于相对静止状态，则他们的时间就一致，但是一旦他们相互运动则不一致。

这已经被很多实验所证实，其中包括两台以相反方向绕世界飞行的精确的钟表回返后显示时间的非常微小的差异(图 1.4)。这似乎暗示，人们若要活得更长久，应该不断地向东飞去，使得地球的旋转叠加上飞机的速度。然而，人们所获取的比一秒还短得多的生命延长，远远不及劣质飞机餐对健康的残害。

爱因斯坦的假定，即自然定律对于所有自由运动的观察者应该显得相同，是相对论的基础。之所以这么称呼

图 1.4
孪生子佯谬的一种版本（参见，图 1.5）已被围绕着地球在相反方向上飞行的两台精确的钟表的实验所验证。
当它们重新相遇时，向东飞行的钟表流逝的时间稍微短一些。


a2
b
b2



左图 1.5
孪生子佯谬

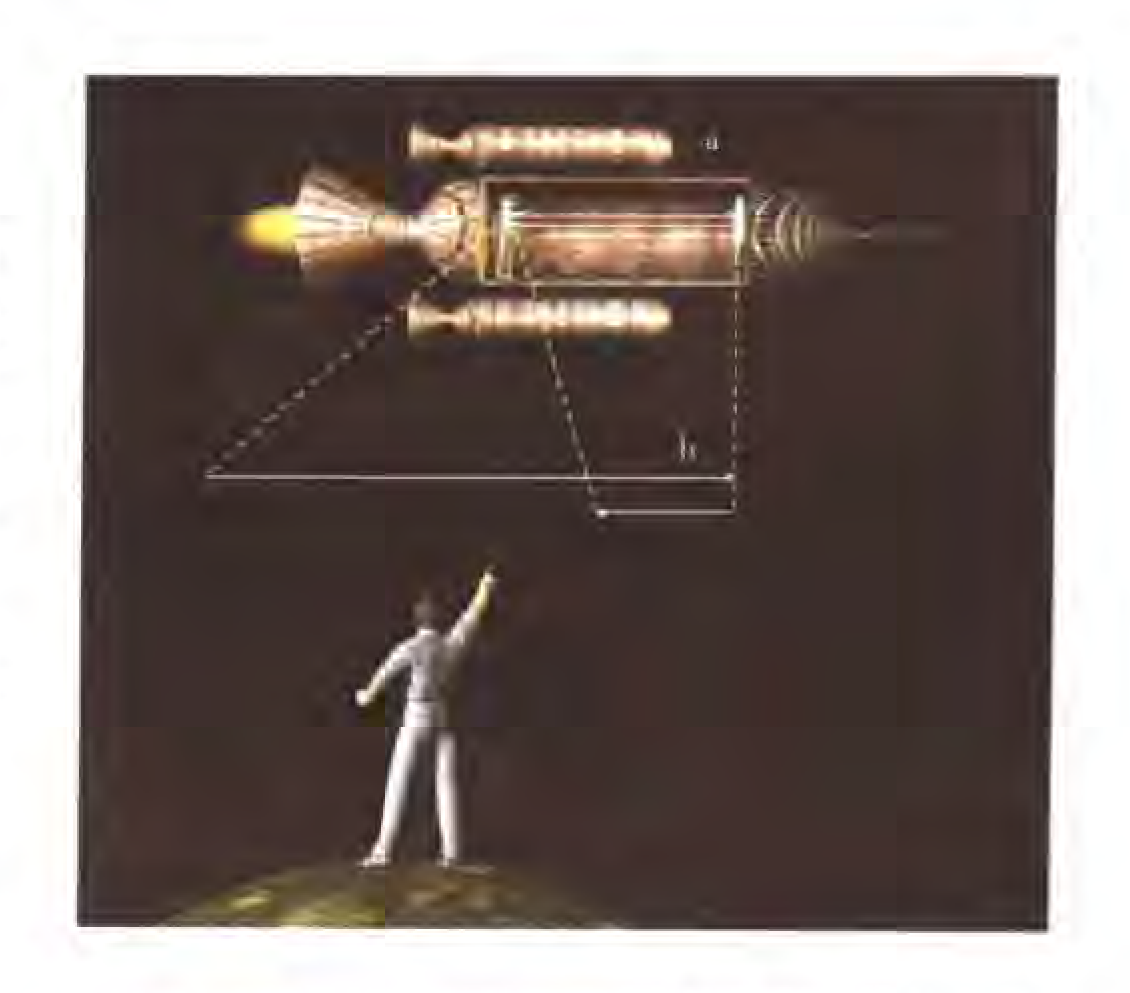
在相对论中每位观察者都具有自身的时间测度。这会导致所谓的孪生子佯谬

孪生子中的一位(a)出发进行空间航行,其航行速度接近于光速(c),而他的兄弟(b)留在地球上

因为他的运动,从地面上的孪生子看,在航天飞船上的时间流逝得更慢

这样在航天者返回时(a2)将会发现他的兄弟(b2)比他更衰老

虽然这似乎和常识相抵触,一系列实验已经证明在这个场景中旅行的孪生子确实更年轻些。



右上图 1.6
一个航天飞船以五分之四的光速从左向右掠过地球。一束光脉冲从座舱的一端发射出并在另一端被反射回来(a)。
在地球上的和在航天飞船上的人分别对光进行观察。因为航天飞船的运动,他们在光返回的旅行距离上意见不同(b)。
因为按照爱因斯坦关于对所有自由运动的观察者光速相同的假设,他们在光花费多少时间飞行上意见也应该不同。

是因为它意味着只有相对运动才是重要的。它的美丽和简单征服了许多思想家,但是仍然有许多人反对。爱因斯坦推翻了19世纪科学的两个绝对物:以太代表的绝对静止和所有钟表都测量的绝对或普适时间。许多人觉得这是一个令人不安的概念。他们问道,这是否意味着,万物都是相对的,甚至不存在绝对的道德标准呢?这种苦恼持续贯穿20世纪20年代和30年代。1921年爱因斯坦获得诺贝尔奖时,其颂辞是至关重要的,但是按照他的标准却是相对次要的,也是在1905年做的研究。它没有提及相对论,因为相对论被认为太过于争议性了(我仍然每周收到两三封信,告诉我爱因斯坦是错误的)。尽管如此,现在科学界已经完全接受了相对论,无数的应用证实了它的预言。

相对论的一个非常重要的推论是质量和能量的关系。爱因斯坦关于光速对于任何人而言都显得相同的假

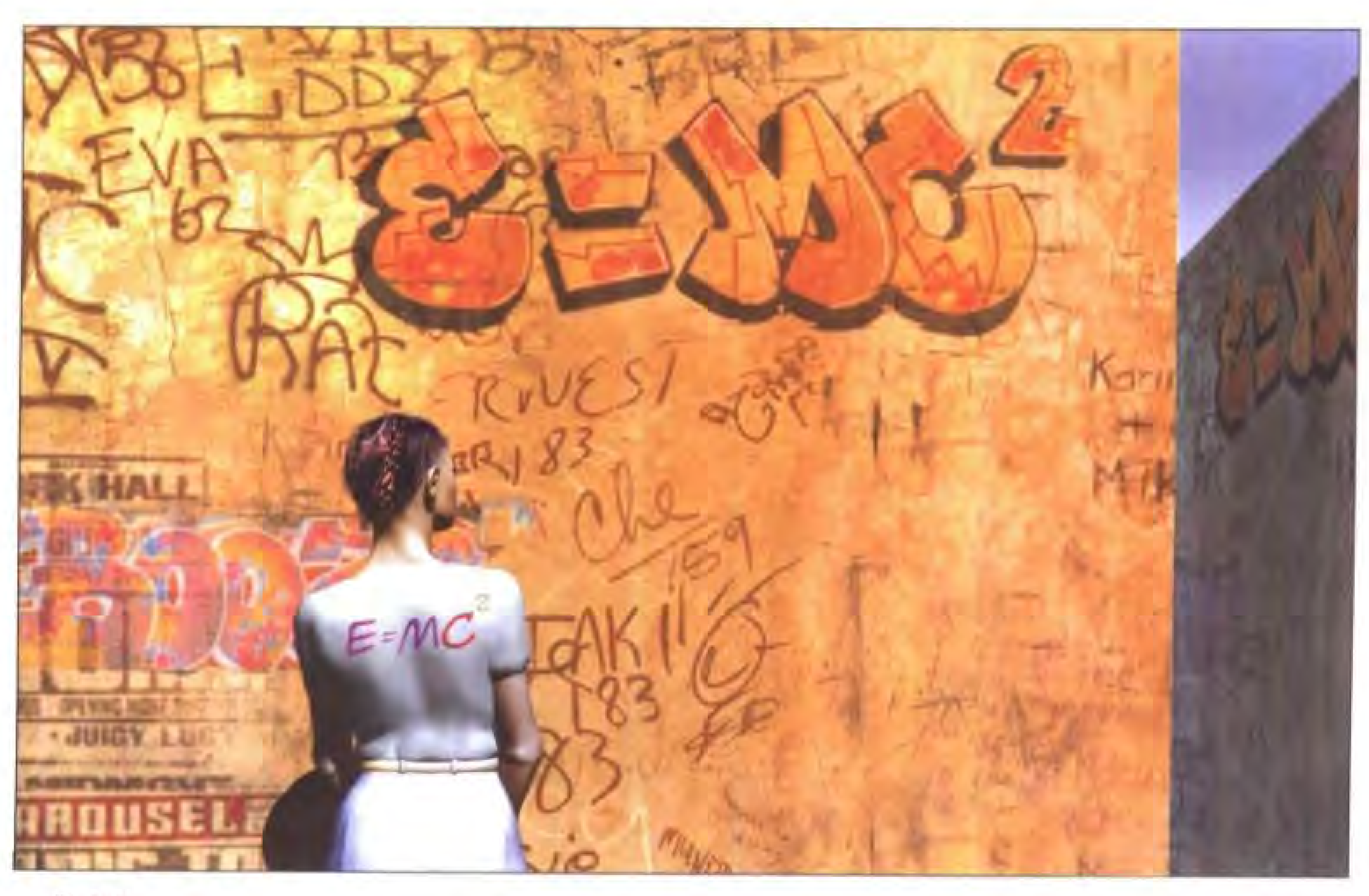


图 1.7





设意味着，没有东西可以运动得比光还快。当人们用能量加速任何物体，无论是粒子或者空间飞船，实际上发生的是，它的质量增加，使得对它进一步加速更加困难。要把一个粒子加速到光速要消耗无限大能量，因而是不可能的。正如爱因斯坦的著名公式所总结的（图 1.7），质量和能量是等效的。这也许是物理学中惟一的妇孺皆知的公式。它的一项后果是意识到，如果铀原子核裂变成总质量稍小的两个核，就会释放出巨大的能量（见 14 页，图 1.8）。

1939 年世界大战迫在眉睫，众多意识到这些含义的科学家说服爱因斯坦克服其和平主义原则，以他的权威给罗斯福总统写一封信，要求美国开始核研究计划。

这就导致了曼哈顿规划并最终产生了于 1945 年在日本的广岛和长崎爆炸的原子弹。有人将原子弹归咎于爱因斯坦发现了质能关系；但是这和把飞机失事归咎于





爱因斯坦在1939年致罗斯福总统的富有预见的信函。

"在最近的四个月里，通过在法国的约里奥以及在美国的费米和西拉德的研究，似乎在大量铀元素中可能建立核子连锁反应，由此可以产生巨大的功率以及大量的新的类镭元素。现在几乎可以肯定，在最近的将来就能立即实现这一切。

这种新现象也会导致制造一种新型炸弹，那是一种极其强大的炸弹，这是可以想见的，虽然比前面所说的不确定得多。"

牛顿发现了引力很类似。爱因斯坦本人没有参与曼哈顿规划，并且为投掷原子弹而感到震惊。

爱因斯坦1905年的开创性论文为他建立了科学声望。但是直到1909年他才得到苏黎世大学的位置，这使他能离开瑞士专利局。两年之后，他转到布拉格的日尔曼大学。但是1912年他回到苏黎世，这一次是返回苏黎世高工。尽管在欧洲的许多地方，甚至在大学中盛行反犹主义，他现在是学术界巨星。维也纳和乌特勒希特都邀他任教，但是他选择了柏林的普鲁士科学院的研究员职务，因为这样他可以摆脱教学。1914年4月他迁往柏林，不久他的妻子和两个儿子也来团聚。然而婚姻不谐已有时日，他的家庭不久返回苏黎世。尽管他偶尔去看望他们，他和妻子最终还是离婚了。爱因斯坦后来娶了他住在柏林的表姐爱尔莎。在战争年代里他过着独身生活，避免了家事纠



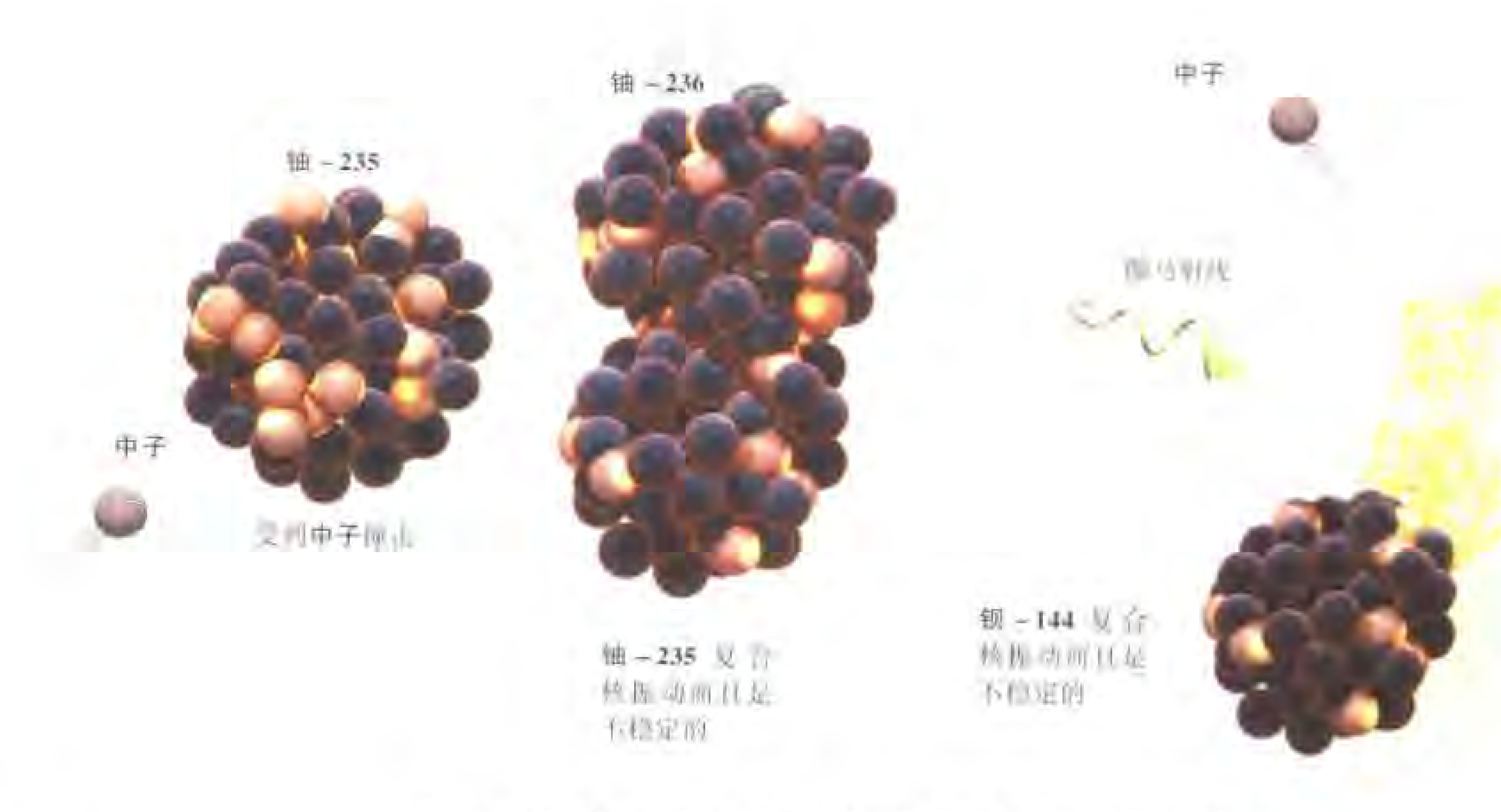


图 1.8
核束缚能

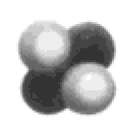
核是由被强力捆在一起的质子和中子构成。但是核的质量总是比组成它的质子和中子的各自质量之和小。其差别就是把核捆在一起的束缚能的度量。可从爱因斯坦关系算出这一束缚能：核束缚能 $= \Delta mc^2$，此处 Δm 是核质量和单独质量和的差。

正是这一势能的释放产生了核武器的毁灭性的爆炸力。

缠，也许是他在这一段期间科学上多产的一个原因。

虽然相对论和制约电磁学的定律配合得天衣无缝，它却不能和牛顿的引力定律相协调。牛顿引力定律说，如果人们在空间的一个区域改变物质分布，引力场的改变在宇宙其他任何地方就会瞬刻被觉察到。这不仅意味着人们可以发送比光还快的讯号（这是相对论禁止的）；为了知道这里瞬刻的含义，它还需要存在绝对或普适时间。这正是那种被相对论抛弃了的，并被个人时间所取代的时间。

1907 年当爱因斯坦还在伯尔尼的专利局工作时，他就知道了这个困难，但是直到 1911 年他在布拉格时才开始认真地思考这个问题。他意识到在加速度和引力场之间存在一个紧密的关系。待在一个封闭盒子，譬如升降机中的某人不能将盒子静止地处于地球引力场中和盒子在自由空间中被火箭加速这两种情形区别开来（当然，爱因



氪－89 复合核振动而且是不稳定的

裂变平均得到 2.4 个中子和 2.15 兆电子伏能量

爱因斯坦在能量（E）、质量（m）和光速（c）之间的方程指出，很小的质量等效于巨大的能量 $\mathbf{E=mc^2}$。



束缚中子



质子



自由中子

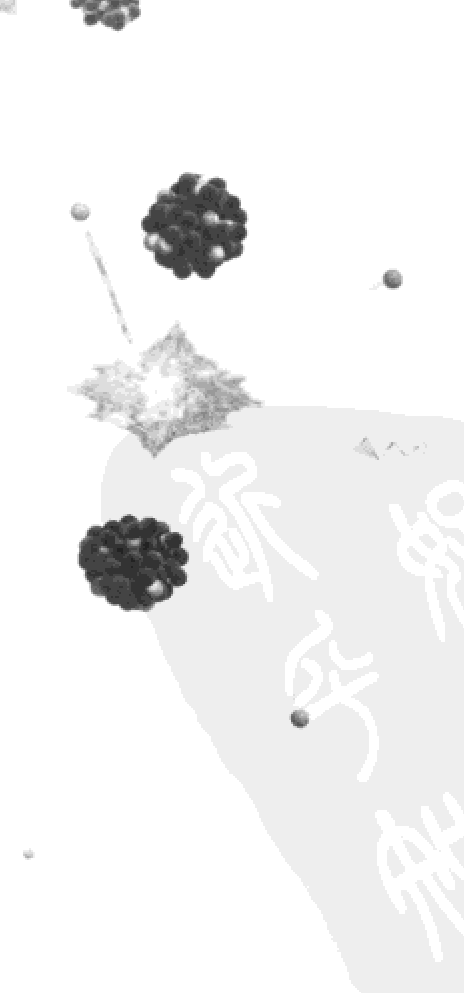


中子能启始连锁反应

伽马射线



中子



连锁反应

从最初的铀－235 裂变产生的中子撞击另一个核。这就导致它裂变，接着进一步碰撞的连锁反应开始。

如果这种反应能维持下去就被称为“临界的”，而铀－235 的质量被称为“临界质量”。



图 1.9
在一个盒子中的观察者无法区分两种情形：(**a**) 处于地球上的固定的升降机中和(**b**)在自由空间中被火箭加速。如果火箭发动机关闭 (**c**)，其感觉就和升降机向通道底部自由下落一样(**d**)。

斯坦处于《星际航行》时代之前，只能想到升降机中而不是空间飞船中的人)。但是人们在升降机中加速或者自由下落不远就会发生灾难(图 1.9)。

如果地球是平坦的，人们既可以说苹果因为引力而落到牛顿头上，也可以等效地说因为牛顿和地球表面被往上加速（图 1.10）。然而，对于球形地球加速度和引力之间的等效似乎不成立，世界相反两边的人们要停留在固定的相互距离上就必须在相反的方向上被加速(图 1.11)。

在爱因斯坦 1912 年回苏黎世时，他灵感奔涌，意识



图 1.10

图 1.11

到如果时空几何是弯曲的，而不是像迄今所假定的那样平坦的，则等效成立。他的思想是质量和能量以一种还未被确定的方式将时空弯曲。诸如苹果或者行星的物体在通过时空时企图沿着直线运行，但是因为时空是弯曲的，所以它们的轨道显得被引力场所弯折(图 1.12)。

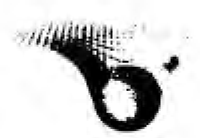
爱因斯坦借助于他的朋友玛索尔·格罗斯曼通晓了弯曲空间和面的理论。在此之前乔治·弗雷德里希·黎曼把这种理论发展成一种抽象数学；黎曼从未想到它和实在世界有何相干。1913 年爱因斯坦和格罗斯曼合写了一篇论文，他们在论文中提出了这样的思想，我们认为是引力的

如果地球是平坦的(图 1.10)，人们既可以说因为重力苹果落到牛顿头上，也可以说地球和牛顿被向上加速。因为对于球形地球(图 1.11)，在世界相反两边的人们会相互越离越远，所以这种等效不成立。爱因斯坦使空间和时间变得弯曲，从而克服了这个困难

图 1.12 时空弯曲

只有当一个大质量的物体将时空弯曲并由此将在它邻近的物体的路径弯折，加速度和引力才能是等效的。

只不过是时空为弯曲的这一事实的表现。然而，由于爱因斯坦的一个错误（他相当人性和易犯错误），他们未能找到将时空曲率和处于其中的质量和能量相联系的方程。爱因斯坦在柏林继续研究这个问题。他不受家事的烦扰，而且基本上不受战争影响，终于在 1915 年 11 月找到了正确的方程。1915 年夏天，当他访问哥廷根大学时曾经和数学家大卫·希尔伯特讨论过他的思想，希尔伯特甚至比爱因斯坦还早几天独立地找到了同一方程。尽管如此，正如希尔伯特本人承认的，新理论的功劳应归于爱因斯坦：把引力和时空弯曲联系起来正是爱因斯坦的思想。这个时期的德国作为文明国家是值得赞扬的，甚至在战时科学讨论和交流仍然





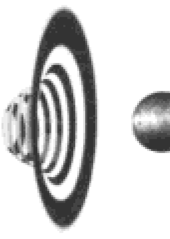
可以不受干扰地进行 这和20年后的纳粹时期相比真是天壤之别。



Albert Einstein™

弯曲时空的新理论被称为广义相对论，以和原先没有引力的理论相区别，后者现在被称为狭义相对论。1919年当英国赴西非的探险队在日食时观察到光线通过太阳邻近被稍微偏折（图1.13），广义相对论因而得到了辉煌的确认。这正是空间和时间被弯曲的直接证据。它激励了从欧几里得在公元前300年左右写下《几何原本》以来，我们对自身生活其间的宇宙之认识的最大变革。

爱因斯坦的广义相对论把空间和时间从一个事件在其中发生的被动的背景转变成宇宙动力学的主动参与者。这就引发了一个伟大的问题，这个问题在21世纪仍然处于物理学的最前沿。宇宙充满



a

b

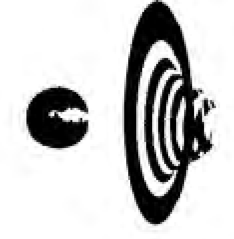


图 1.13 光线弯曲

从一个恒星发出的通过太阳邻近的光线被太阳质量弯曲时空的方式折射(**a**)。这使得从地球上看该恒星的表观位置发生轻微的移动(**b**)。日蚀时可以观察到这个效应。

物质，而物质弯曲时空使得物体落到一块。爱因斯坦发现他的方程没有描述一个静态，也就是在时间中不变的宇宙的解。他宁愿不放弃这样一种永恒的宇宙，这正是他和其他大多数人所深信的，而不惜对该方程进行补缀，添加上称为宇宙常数的一项。宇宙常数在相反的意义上将时空弯曲，使得物体相互离开。宇宙常数的排斥效应可以平衡物质的吸引效应，这样就容许宇宙具有静态解。这是理论物理学的历史中错失的最重大的机会之一。如果爱因斯坦坚持其原先的方程，他就能够预言宇宙要么正在膨胀，要么正在收缩，二者必居其一。直至 20 世纪 20 年代在威尔逊山上用 100 英寸(1 英寸 = 2.54 厘米)望远镜进行观测，人们才认真接受随时间变化的宇宙的可能性。

这些观测揭示了，星系和我们相距越远，则越快速地离开我们而去。宇宙正在膨胀，任何两个星系之间的距离随时间恒定地增加(图 1.14，见 22 页)。这个发现排除了为获得静态宇宙解对宇宙常数的需要。爱因斯坦后来把宇宙常数称为他一生中最大的错误。然而，现在看来这也许根本不是什么错误：将在

图 1.14
对星系进行观测表明宇宙正在膨胀：几乎任何一对星系之间的距离都在增大

第三章中描述的现代观测暗示，也许确实存在一个小的宇宙常数。

广义相对论彻底地改变了有关宇宙起源和命运的讨论。一个静态的宇宙可以存在无限长时间，或者以它目前的形状在过去的某个瞬间创生。然而，如果现在星系正在相互分开，这表明它们过去曾经更加靠近。大约 150 亿年以前，所有它们都会相互落在一起，而且密度非常巨大。天主教牧师乔治·拉玛特是第一位研究我们今天叫做大爆炸的宇宙起源。他把这种状态称作"太初原子"。

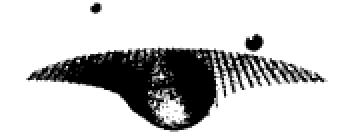
爱因斯坦似乎从未认真地接受过大爆炸。他显然认为，如果人们随着星系的运动在时间上回溯过去，则一个一致膨胀宇宙的简单模型就会失效，因为星系的很小的斜向速度将会使它们相互错开。他认为，宇宙也许早先有



过一个收缩相，在一个相当适度的密度下反弹成现在的膨胀。然而，我们现在知道，为了在早期宇宙中核反应能产生在我们周围观察到的轻元素的数量，其密度曾经至少达到每立方英寸 10 吨；而且温度达到 100 亿度。况且，微波背景的观测显示，密度也许一度达到每立方英寸一亿亿亿亿亿亿亿亿亿（1 后面跟 72 个零）吨。我们现在还知道，爱因斯坦的广义相对论不允许宇宙从一个收缩相反弹到现在的膨胀。正如在第二章中将要讨论的，罗杰·彭罗斯和我能够证明，广义相对论预言宇宙从大爆炸启始。这样爱因斯坦理论的确隐含着时间有一开端，虽然他从不喜欢这个思想。

威尔逊山天文台 100 英寸(1 英寸 = 2.54 厘米)胡科望远镜。

爱因斯坦甚至更不愿意承认广义相对论的预言，即当一个重质量恒星到达其生命的终点，而且不能产生足



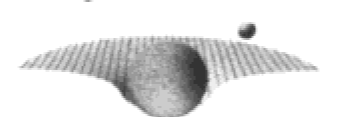
右图 1.15
当一个大质量的恒星消耗完它的核燃料时，它将丧失热量并且收缩。时空将被弯翘得这么厉害以至于产生黑洞。光不能从黑洞逃逸。时间将在黑洞之内终结。

够的热去平衡其自身使它收缩的引力时，时间将会到达尽头。爱因斯坦认为，这样的恒星将会在某一终态安定下来。但是我们现在知道，对于比太阳质量两倍还大的恒星并不存在终态的构型。这类恒星将会继续收缩直至它们变成黑洞。黑洞是时空中如此弯曲的一个区域，甚至连光线都无法从那里逃逸出来(图 1.15)。

彭罗斯和我证明了，广义相对论预言，无论是该恒星，还是任何不慎落入黑洞的可怜的航天员，其时间在黑洞中都将到达终点。但是无论是时间的开端还是终结都是广义相对论方程不能被定义之处。这样理论不能预言从大爆炸会出现什么。有些人将此视作上帝具有随心所欲创生宇宙的自由的显示，但是其他人(包括我自己)觉得宇宙的开端应受在其他时刻成立的同样定律的制约。正如将在第三章中所描述的那样，我们为达到这一目标已经取得一些进展。但是我们尚未完全理解宇宙的起源。

广义相对论在大爆炸处失效的原因是它和量子理论不相协调。量子理论是 20 世纪早期的另一项伟大的观念变革。1900 年马克斯·普朗克在柏林发现，如果光只能以分立的称为量子的波包发射或者吸收，就可以解释来自一个炽热物体的辐射。这是向量子理论进展的第一步。1905 年爱因斯坦在专利局撰写的开创性论文中的一篇里指出，普朗克的量子假设可以解释所谓的光电效应。光电效应是讲当光照射到某些金属表面时释放电子的方式。这是现代光检测器和电视摄像机的基础，也正是因为这个工作，爱因斯坦获得了物理学的诺贝尔奖。

直至 1920 年爱因斯坦继续研究量子的思想，但是哥本哈根的威纳·海森堡，剑桥的保罗·狄拉克和苏黎世的厄文·薛定谔的工作使他深为困扰。这些人发展了所



3）

时间在黑洞内终结。

2）

随着恒星收缩时空越发翘曲。

1）

在一个燃烧核燃料的大质量恒星周围的时空翘曲。



阿尔伯特·爱因斯坦和他本人的木偶合影，该照片摄于他到美国定居后不久。

谓量子力学的实在的新图像。微小的粒子不再具有确定的位置和速度。相反地，粒子的位置被确定得越准确，其速度则被确定得越不准确，反之亦然。基本定律中的这一随机的不可预见的要素使爱因斯坦震惊，他从未全盘接受过量子力学。他的著名格言表达了他的感受："上帝不玩弄骰子。"然而，新的量子定律能够解释整个范围原先未能阐明的现象以及和观测极好地符合，所以其他为数不多的科学家欣然接受它们的有效性。它们是现代化学、分子生物学和电子学发展的基础，也是近50年来使世界发生翻天覆地变化的技术的基础。

1933年12月获悉纳粹和希特勒即将在德国上台，爱因斯坦离开德国并且四个月后放弃德国国籍。他的最后20年是在新泽西普林斯顿的高等学术研究所度过的。

纳粹在德国发动了反对"犹太人科学"运动，而许多德国科学家是犹太人；这是德国不能制造原子弹的部分原因。爱因斯坦和相对论成为这个运动的主要目标。当他听说出版题为《100个反爱因斯坦的作家》的一本书时，回答道："何必要100个人呢？如果我是错的，一个人就足够了。"第二次世界大战之后，他要求盟国政府建立一个世界政府以控制原子弹。1948年他拒绝了担任以色列新国家总统的邀请。他有一回说过："政治是为当前，而一个方程却是一种永恒的东西。"广义相对论的爱因斯坦方程是他最好的墓志铭和纪念物。它们将和宇宙同在。

世界在上一世纪的改变超过了以往的任一世纪。其原因并非新的政治或经济的教义，而是由于基础科学的进步导致了技术的巨大发展。还有何人比阿尔伯特·爱因斯坦更能代表这些进步呢？



Albert Einstein™



第二章
时间的形态

爱因斯坦的广义相对论使时间具有形态。这如何与量子论相互和谐。



可能存在复杂的圈环吗？

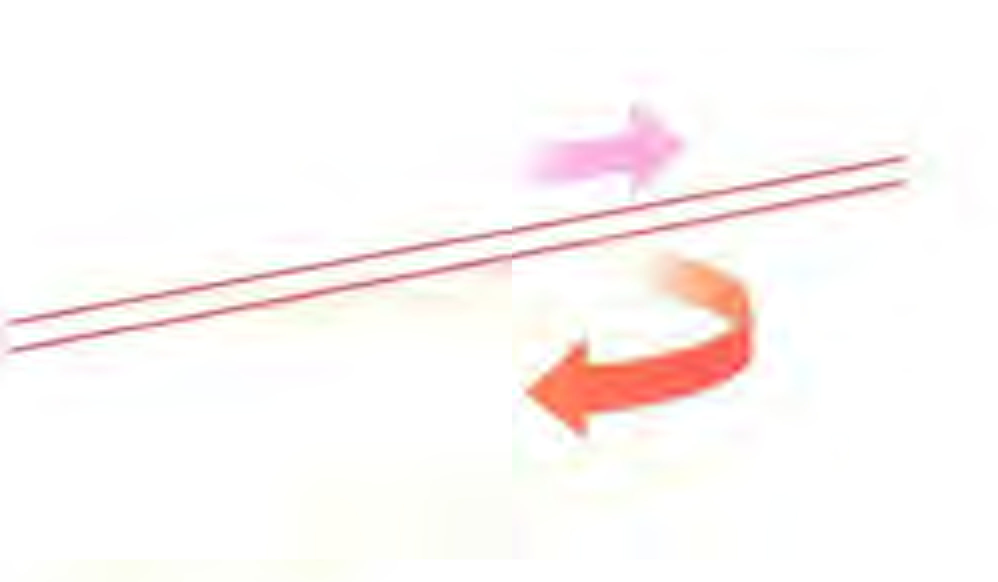
从过去向未来的主线铁轨。

时间能否在一根支线上返回过去？

图 2.1　时间的铁轨模型

只存在一根向未来一个方向延伸的主线呢，或者还存在返回过去并在更早先的时刻连接到主线上去的圈环呢？





时间为何物？它是否像古老赞歌说的那样，把我们所有的梦想一卷而空的东流逝波？抑或像一道铁轨？它或许有环状侧线和分叉，这样你可以一直前进，却又回到线上的早先过站(图2.1)。

19世纪作家查里斯·兰姆写道："世间万物没有任何东西像时间和空间那么使我困惑。然而没有任何东西比时间和空间更少使我烦恼，因为我从不想起它们。"我们中的大多数人在大部分时间不去忧虑时间和空间，不管它们为何物；但是我们所有人有时极想知道时间是什么，它如何开始，并且把我们导向何方。

关于时间或者任何别的概念的任何可靠的科学理论，依照我的意见，都必须基于最可操作的科学哲学之上：这就是卡尔·波普和其他人提出的实证主义的方法。按照这种思维方式，科学理论是一种数学模型，它能描述和整理我们所进行的观测。一种好的理论可在一些简单假设的基础上描述大范围内的现象，并且做出能被检验的确定的预言。如果预言和观测相一致，则该理论在



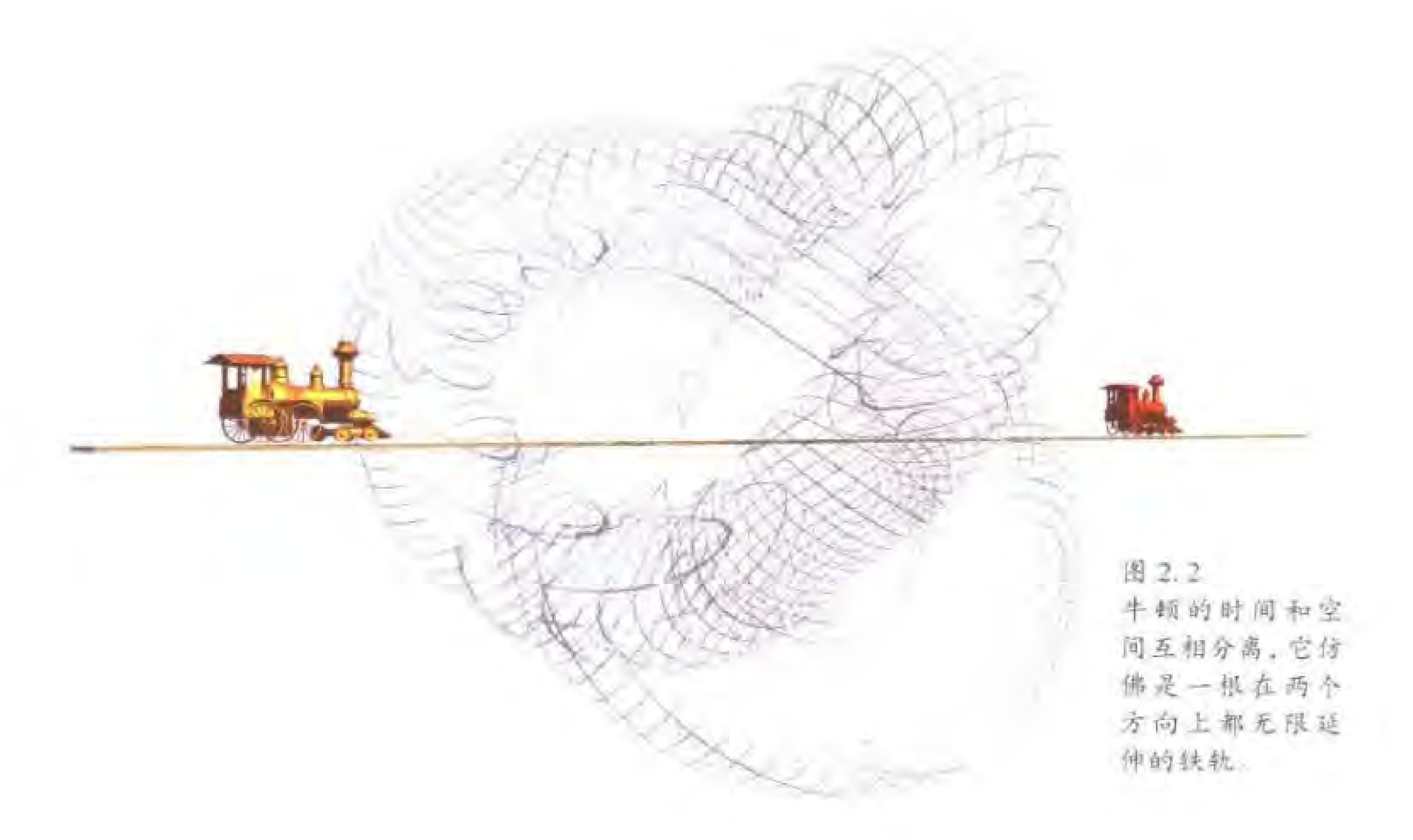
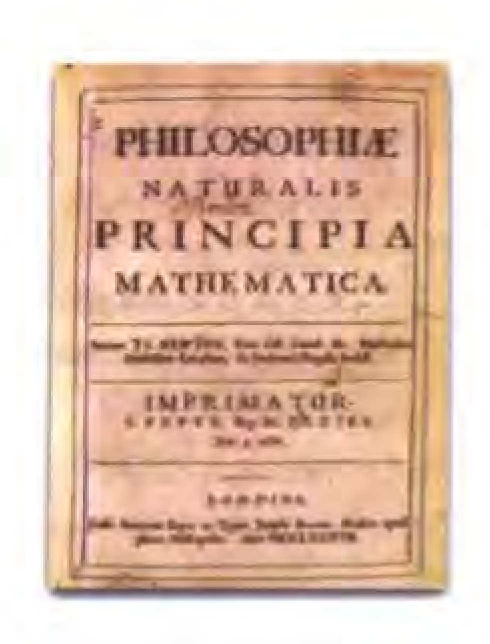


图 2.2
牛顿的时间和空间互相分离，它仿佛是一根在两个方向上都无限延伸的铁轨。


PHILOSOPHIÆ NATURALIS PRINCIPIA MATHEMATICA

IMPRIMATUR

艾萨克·牛顿在300多年以前发表了他的时间和空间的数学模型。

这个检验下存活，尽管它永远不可能被证明是正确的。另一方面，如果观测和预言相抵触，人们必须将该理论抛弃或者修正（至少，人们认为这总要发生的。但是人们在实际中经常诘问观测的精确性和可靠性以及那些观察者的道德品质。）。如果人们如同我那样，采用实证主义立场，他就不能说时间究竟为何物。人们所能做的一切，是将所发现的描述成时间的一种非常好的数学模型并且说明它能预言什么。

艾萨克·牛顿在1687年出版的《数学原理》一书中为我们给出时间和空间的第一个数学模型。牛顿担任剑桥的卢卡斯教席。我现在担任的正是同一教席，虽然在牛顿那个时代这一教席不用电力驱动。时间和空间在牛顿的模型中是事件发生的背景，但是这种背景不受事件的影响。时间和空间相互分离。时间被认为是一根单独的



图 2.3



时间的形态和方向

爱因斯坦的相对论和大量的实验相互符合，它指出时间和空间是非常复杂地相互纠缠在一起。

人们不能单独使空间弯曲而不涉及时间。这样，时间就有了形态。然而，它只能往一个方向前进，正如图 M 中的火车头那样。

图 2.4
橡皮膜比喻

中心的大球代表一个大质量物体，譬如一个恒星。它的质量使它邻近的膜弯曲。其曲率使在膜上滚动的滚珠轨迹弯折并且围绕着大球转动，就和在一个恒星的引力场中的行星能围绕着它公转一样

线，或者是两端无限延伸的铁轨（图 2.2）。时间本身被认为是永恒的，这是在它已经并将永远存在的意义上来说的。与此相反，大多数人认为有形宇宙是在仅几千年前以多少和现状相同的形态创生的。这使哲学家们忧虑，譬如德国思想家伊曼努尔·康德。如果宇宙的的确确是被创生的，那么为何要在创生之前等待无限久？另一方面，如果宇宙已经存在了无限久，为何将发生的每一件事不早已发生，使得历史早已完结？特别是，为何宇宙尚未到达热平衡，使得万物都具有相同温度？

康德把这个问题称作“纯粹理性的二律背反”，因为它似乎是一个逻辑矛盾；它没有办法解决。但是它只是在



牛顿数学模型的框架里才是矛盾。时间在牛顿模型中是一根无限的线，独立于在宇宙中发生的东西。然而，正如我们在第一章中看到的，爱因斯坦在1915年提出了一种崭新的数学模型：广义相对论。在爱因斯坦论文以后的年代里，我们又添加了一些细节，但是爱因斯坦提出的理论仍然是我们时间和空间模型的基础。本章和下几章将描述，从爱因斯坦革命性论文之后的年代里我们观念的发展。这是许许多多人合作成功的故事，而且我为自己的小贡献感到自豪。

广义相对论把时间维和空间的三维合并形成所谓的时空（见33页，图2.3）。该理论将引力效应具体化，为宇宙中物质和能量的分布引起时空弯曲和畸变，使之不平坦的思想。这个时空中的物体企图沿着直线运动，但是因为时空是弯曲的，它们的轨迹显得被弯折了。它们的运动犹如受到引力场的影响。

作为一个粗糙的比喻，但不要过于拘泥，想象一张橡皮膜。人们可把一个大球放在膜上，它代表太阳。球的质量把膜压陷下去，使之在太阳邻近弯曲。现在如果人们在膜上滚动小滚珠，它不会直接地穿到对面去，而是围绕着该重物运动，正如行星绕日公转一样（见34页，图2.4）。

这个比喻是不完整的，因为在这个比喻中只有空间的两维截面（橡皮膜的表面）是弯曲的，而时间正如在牛顿理论中那样，没有受到扰动。然而，在与大量实验相符合的相对论中，时间和空间难分难解地相互纠缠。人们不能只使空间弯曲，而让时间安然无恙。这样时间就被赋予了形态。广义相对论使空间和时间弯曲，把它们从被动的事件发生的背景改变成为发生的事件的动力参与者。在牛顿理论中，时间独立于其他万物而存在，人们也许会诘问：上帝在创造宇宙之前做什么？正如圣·奥古斯丁说的，人们不可以此为笑柄，就像有人这样说过："祂正为那些寻根究底的人们准备地狱。"这是一个人们世代深思的严肃的问题。根据圣·奥古斯丁的说法，在上帝制造天地之



圣·奥古斯丁，这位5世纪的思想家认为在世界开端之前时间不存在。

取自《上帝之城》，12世纪，劳伦佐图书馆，翡冷翠。

前，祂根本无所作为。事实上，这和现代观念非常接近。

另一方面，在广义相对论中时间和空间的存在不仅不能独立于宇宙，而且不能相互独立。在宇宙中的测量将它们定义，譬如钟表中的石英晶体的振动数或者尺子的长度。以这种方式在宇宙中定义的时间应该有一个最小或者最大值，换言之，即开端或者终结，这是完全可以理解的。询问在开端之前或者终结之后发生什么是没有任何意义的，因为这种时间是不被定义的。

决定广义相对论的数学模型是否预言宇宙以及时间本身应有一个开端或者终结，显然是非常重要的。在包括爱因斯坦在内的理论物理学家中有一种普遍成见，认为时间在两个方向都必须是无限的。否则的话就引起有关宇宙创生的令人不安的问题，这个问题似乎在科学王国之外。人们知道时间具有开端或者终结的爱因斯坦方程的解，但是所有这些解都是非常特殊的，具有大量的对称性。人们以为，在自身引力之下坍缩的实际物体，压力或者斜方向的速度会阻止所有物质一道落向同一点，使那一点的密度变成无穷大。类似地，如果人们在时间的相反方向将宇宙膨胀倒溯回去，他会发现宇宙中的全部物质并非从具有无限密度的一点涌现。这样无限密度的点被称为奇点，并且是时间的开端或终结。

1963年两位苏联科学家叶弗根尼·利弗席兹和艾萨克·哈拉尼科夫宣称他们证明了，所有具有奇点的爱因斯坦方程的解都对物质和速度做过特殊的安置。代表宇宙的解具有这种特殊安置的机会实际上为零。几乎所有能代表宇宙的解都避免无限密度的奇点：在宇宙膨胀时期之前必须预先存在一个收缩相。在收缩相中物质落到一起，但是相互之间不碰撞，在现在的膨胀相中重新分离。如果事实果真如此，则时间就会从无限过去向无限将来永远流逝。

利弗席兹和哈拉尼科夫的论证并没有使所有人信服。相反地，罗杰·彭罗斯和我采用了不同的手段，不像



图2.5 我们的过去光锥

当我们观看遥远的星系，因为光以有限的速度传播，所以我们是在看早先时刻的宇宙。如果我们用垂直方向来代表时间，用水平方向来代表三个空间方向中的两个，那么在此刻到达处于顶点的我们的光线是从一个圆锥面传播来的

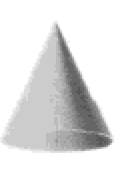


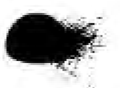


图 2.6
微波背景谱的测量

宇宙微波背景辐射谱——强度随频率的分布——是典型的热体辐射谱。为了使辐射处于热平衡，物体必须将它多次散射。这表明在我们的过去光锥上一定有足够的物质使它向内弯折。

他们那样基于解的细节研究，而是基于时空的全局结构。在广义相对论中，不仅时空中的大质量物体而且能量使它弯曲。能量总是正的，所以它赋予时空以曲率，曲率使光线的轨道向对方弯折。

现在考虑我们的过去光锥(图 2.5)，也就是从遥远的星系来在此刻到达我们的光线通过时空的途径。在一张时间向上方画空间往四边画的图上，它是一个圆锥，其顶点正是我们的此时此地。随着我们在光锥中从顶点向下走向过去，我们就看到越来越早的星系。因为迄今为止宇



宙都在膨胀，而且所有的东西在以前更加靠近得多。当我们更进一步往回看，我们便透过物质密度更高的区域。我们观测到微波辐射的黯淡背景，这种辐射是从宇宙在比现在密集得多也热得多的极早的时刻，沿着我们的过去光锥传播到我们的。我们把接收器调谐到微波的不同频率，就能测量到这个辐射的谱（功率随频率的分布）。我们发现了一个温度比绝对零度高2.7度的物体发出的特征辐射谱。这种微波辐射不能溶化冻皮萨饼，但是该谱和2.7度的物体辐射谱那么一致这一事实告诉我们，这种辐

图2.7 翘曲的时空

因为引力是吸引的，物质总是翘曲时空使得光线向相互方向弯折。

观察者在此刻通过时间观看过去

50 亿年前的星系

微波背景

物质密度使光锥向内弯折

大爆炸奇点

时间

空间



射必须起源于对微波不透明的区域(见38页,图2.6)。

这样,我们能够得出结论,当我们沿着过去光锥回溯过去,它必须通过一定量的物质。这么多的物质足以弯曲时空,使得我们过去光锥中的光线往相互方向弯折(图2.7)。

当我们往过去回溯,过去光锥的截面会达到最大尺度,然后开始再度缩小。我们的过去是梨子形状的(图2.8)。

当人们沿着我们过去光锥回溯得更远,物质的正的能量密度引起光线朝相互方面更强烈地弯折。光锥的截面在有限的时间内缩小到零尺度。这意味着在我们过去光锥之内的所有物质被捕获在一个边界收缩为零的区域之内。因此,彭罗斯和我能够在广义相对论的数学模型中证明,时间必须有称为大爆炸的开端就不足为奇了。类似的论证显示,当恒星和星系在它们自身的引力下坍缩形成黑洞,时间会有一个终结。我们抛弃了康德的暗含的假设,即时间具有独立于宇宙的意义的假设,因此逃避了他的纯粹理性的二律背反。我们证明时间具有开端的论文在1969年赢得引力研究基金会的第二名论文奖,罗杰和我对分了这丰厚的300美元。我认为同一年获奖的其他论文没有什么久远的价值。

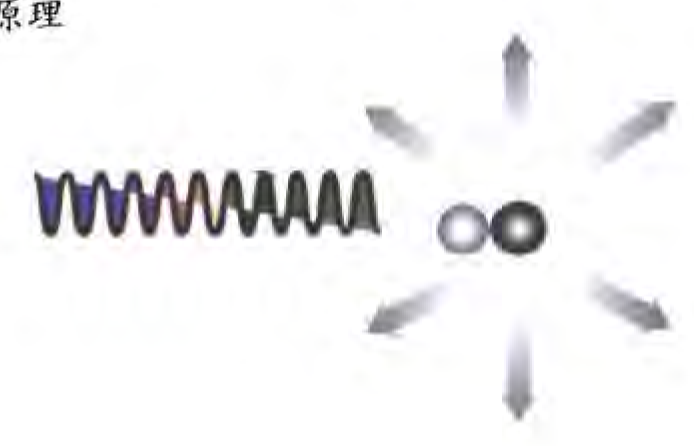
我们的研究引起了各式各样的反应。它使很多物理

左图2.8 时间是梨形的

如果人们沿着我们过去光锥回到以前,在早期宇宙中物质把光锥弯折回去。我们观察的整个宇宙被包含在一个区域中,其边界在大爆炸缩小至零。这是一个奇点,它是物质密度变成无限大而且经典广义相对论失效的地方。

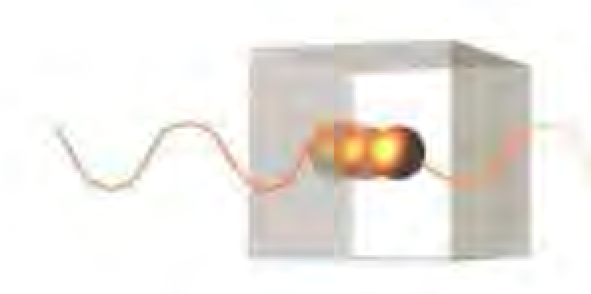
不确定性原理



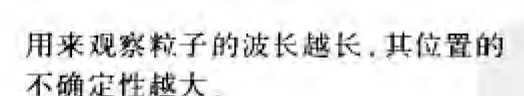


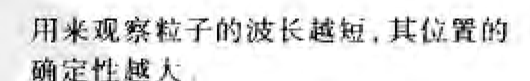
低频波干扰粒子的速度甚小。

高频波干扰粒子的速度甚大









用来观察粒子的波长越长，其位置的不确定性越大。

用来观察粒子的波长越短，其位置的确定性越大。

1900年马克斯·普朗克提出，光总是以他叫做量子的小波包传递的，这是发现量子论的重要步骤。普朗克的量子假设清晰地解释了热体辐射率的观察结果，但是直到20世纪20年代中期其全部含义才被人们意识到。那是当德国物理学家威纳·海森堡提出了著名的不确定性原理之后。

他注意到，普朗克假设意味着，人们企图越精确地测量一个粒子的位置，则他只能越不精确地侧量其速度，反之亦然。

更精确地讲，他证明了粒子位置的不确定性乘以它的动量的不确定性总比普朗克常数大，这个常数是和一个光量子的能量紧密相关的一个量。

海森堡不确定性方程



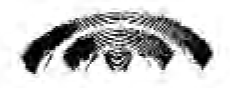
学家烦恼，但是使信仰创世纪的宗教领袖们欣喜：此处便是创世的科学证明。此时，利弗席兹和哈拉尼科夫就处于尴尬的境地。他们无法和我们证明的数学定理争辩，但是在苏维埃制度下，他们又不能承认自己错了，而西方科学是对的。然而，他们找到一族具有奇点的更一般的解，不像他们原先的解那么特殊，以此挽回颓势。这样他们便可以宣称，奇性以及时间的开端或终结是苏维埃的发现。

大多数物理学家仍然本能地讨厌时间具有开端或终结的观念。因此他们指出，可以预料数学模型不能对奇点附近的时空作出很好的描述。其原因是，描述引力的广义相对论是一种经典理论，正如在第一章中提到的，它和制约我们已知的所有其他的力的量子理论的不确定性不相协调。因为在宇宙的大多数地方和大多数时间里，时空弯曲的尺度非常大，量子效应变得显著的尺度非常小，这种不一致性没有什么关系。但是在一个奇点附近这两种尺度可以相互比较，而量子引力效应就会很重要。这样，彭罗斯和我自己的奇性定理真正确立的是，我们时空的经典区域在

麦克斯韦场

1865年英国物理学家詹姆士·克拉克·麦克斯韦把电学和磁学的所有已知定律合并在一起。麦克斯韦理论以从一处到另一处传递作用的“场”的存在为基础。他意识到传递电磁扰动的场是动力学的实体：它们能够振动并且穿越空间运动。

电磁学的麦克斯韦综合可以浓缩成规定这些场的动力学的两个方程。他自己从这些方程推导出第一个伟大的结论：所有频率的电磁波都以同样固定的速率——光速在空间传播。





波长是一个波的波峰之间的距离



图 2.9 前进的波和振动的摆

电磁辐射以波的方式通过空间传播，其电场和磁场在波传播的横向像摆那样振动。其辐射可由不同波长的场构成。

过去或许还在将来以量子引力效应显著的区域为边界。为了理解宇宙的起源和命运，我们需要量子引力论，这将是本书大部分的主题。

具有有限数量粒子系统，譬如原子的量子理论，是1920年由海森堡、薛定谔和狄拉克提出的。（狄拉克是另一位我在剑桥教席的前任，但是这个教席还不是机动的。）然而，人们在试图把量子观念推广到麦克斯韦场时遭遇到了困难。麦克斯韦场描述电、磁和光。

人们可以把麦克斯韦场认为是由不同波长波动组成的，波长是在两个邻近波峰之间的距离。在一个波动中，场就像单摆一样从一个值向另一个值来回摆动（图 2.9）。





图 2.10
具有概率分布的摆

根据海森堡原理，一个摆不可能绝对地指向下方并具有零速度。相反地，量子论预言，甚至在最低的能态，摆都必须具有最小的涨落。

这意味着，摆的位置由概率分布给定。在它的基态，最可能的位置是直接指向下方，但是它还具有在和垂直夹一小角度上被找到的概率。

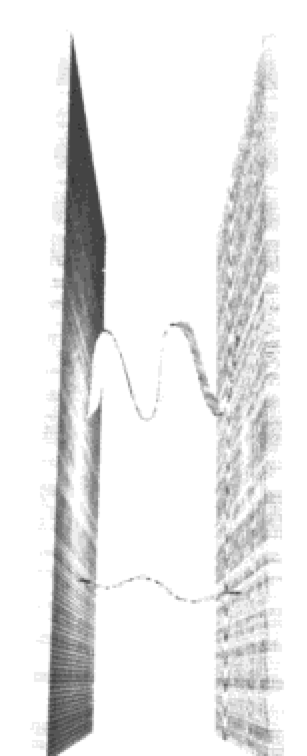
根据量子理论，一个单摆的基态或者最低能量的态不是只停留在最低能量的点上，而直接向下指。如果那样就具有确定的位置和确定的速度，即零速度。这就违反了不确定性原理，这个原理禁止同时精确地测量位置和速度。位置的不确定性乘上动量的不确定性必须大于被称为普朗克常数的一定量。普朗克常数因为经常使用显得太长，所以用一个符号来表明：$\hbar$。

这样一个单摆的基态，或最低能量的态，正如人们预料到的，不具有零能量。相反地，甚至在一个单摆或者任何振动系统的基态之中，必须有一定的称为零点起伏的最小量。这些意味着单摆不必垂直下指，它还有在和垂直

方向成小角度处被发现的概率(图 2. 10)。类似地,甚至在真空或者最低能的态,在麦克斯韦场中的波也不严格为零,而具有很小的量。单摆或者波的频率(每秒钟摆动的数目)越高,则基态的能量越高。

人们计算了麦克斯韦场和电子场的基态起伏,发现这种起伏使电子的表观质量和电荷都变成无穷大,这根本不是我们所观测到的。然而,在 1940 年物理学家理查德·费因曼,朱里安·施温格和朝永振一郎发展了一种协调的方法,除去或者“减掉”这些无穷大,而且只要处理质量和电荷的有限的观测值。尽管如此,基态起伏仍然产生微小效应,这种效应可被测量到并和实验符合得很好。杨振宁和罗伯特·米尔斯提出的理论中的杨－米尔斯场中的无穷大也可用类似的扣除方案消除掉。杨－米尔斯理论是麦克斯韦理论的一种推广,它描述另外两种称为弱核力和强核力的相互作用。然而,在量子引力论中基态起伏具有严重得多的效应。这里重复一下,每一波长各具基态能量。由于麦克斯韦场具有任意短的波长,所以在时空的任一区域中都具有无限数目的不同波长,并因此具有无限量的基态能。因为能量密度和物质一样是引力之源,这种无限大的能量密度表明,宇宙中存在足够的引力吸引,使时空卷曲成单独的一点,显然这并未发生。

人们也许会说基态起伏没有引力效应,以冀解决似乎在观测和理论之间的冲突,但是这也不可行。人们可以利用卡西米尔效应来检测基态起伏的能量。如果你把一对金属板相互平行地放置,并且让它们靠近。平板的效应是把符合在平板之间的波长的数目相对于外面的数目稍微减少一些。这就意味着,在平板之间的基态起伏的能量密度虽然仍为无限大,却比外界的能量密度少了



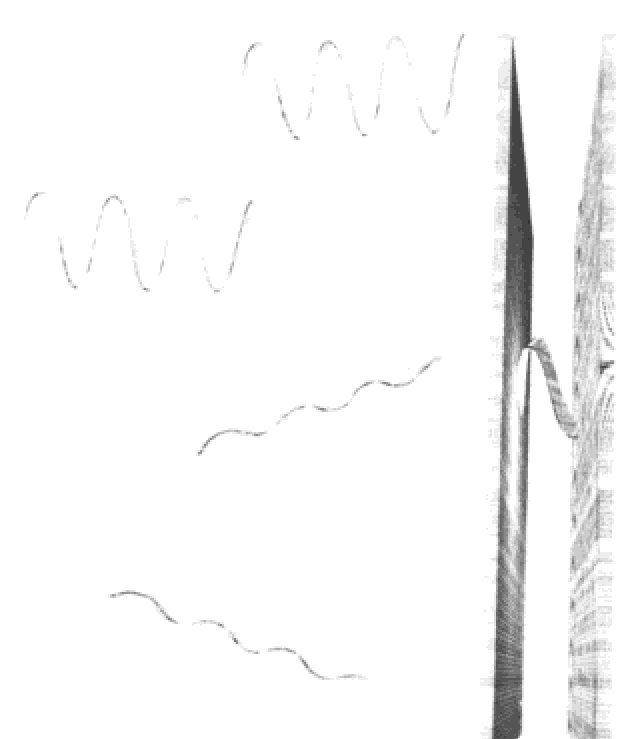
平板疆界之外的波长。

适合于平板之间的波长的减小的数目。



图 2.11
卡西米尔效应

在平行金属板之间的很小的力称为卡西米尔效应，该效应在实验上证实了基态涨落的存在。





平板之间的基态涨落的能量密度比外面的密度小，使平板被拉到一起。

在平板外面的基态涨落的能量密度更大。

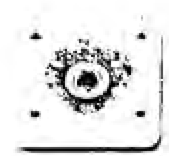
图 2.12

自旋

所有粒子都具有称作自旋的性质，它和粒子从不同方向看起来什么样子相关联。人们可以用扑克牌来展示这一点。首先考虑黑桃么点。只有把它转动一整圈或者 360°，它才显得相同。所以人们说它的自旋为 1。

另一方面，红心皇后有两个头。所以只要转动半圈或者 180°，就变成一样。所以人们说它的自旋为 2。类似地，人们可以想象具有自旋 3 或者更高的对象，它们在更小角度的转动下显得相同。

自旋越高，使粒子显得相同的所需要的整圈的部分就越小。但是以下事实令人印象深刻，存在旋转两整圈才显得相同的粒子，这种粒子被认为具有自旋 1/2。





具有自旋1的粒子

具有自旋2的粒子

具有自旋1/2的粒子

有限量(图2.11)。这种能量密度差产生了将平板拉到一起的力量，这种力量已被实验观测到。在广义相对论中，力正和物质一样是引力的源。这样，如果无视这种能量差的引力效应则是不协调的。

解决这个问题的另一种可能的办法，是假定存在诸如爱因斯坦为了得到宇宙的静态模型引进的宇宙常数。如果该常数具有无限大负值，它就可能精确地对消自由空间中的基态能量的无限大正值。但是这个宇宙常数似乎非常特别，而且必须被无限准确地调准。

1970年人们非常幸运地发现了一种崭新的对称。这种对称机制将从基态起伏引起的无穷大对消了。超对称是我们现代数学模型的一个特征，它可以不同的方式来描述。一种方式是讲，时空除了我们所体验到的维以外还有额外的维。这些维被称为格拉斯曼维，因为它们是用所谓的格拉斯曼变量的数而不用通常的实数来度量。通常的数是可交换的，也就是说你进行乘法时乘数的顺序无关紧要：6乘以4和4乘以6相等。但是格拉斯曼变量是反交换的，x乘以y和-y乘以x相等。

通常的数

$$A \times B = B \times A$$

格拉斯曼数

$$A \times B = -B \times A$$

超对称首先用于无论通常数的维还是格拉斯曼维都

超伴侣

费米子是组成通常物质的具有半整数自旋(例如1/2)的粒子。它们的基态能量是负的。

玻色子是N=8超引力的具有整数自旋(例如0,1,2)的粒子。它们的基态能量是正的。

图2.13

宇宙中的所有已知粒子可以分成两组。它们要么是费米子要么是玻色子。费米子的自旋为半整数(例如自旋为1/2)的粒子,它们构成通常的物体。它们的基态能量是负的。

玻色子的自旋为整数(例如自旋为0,1,2)的粒子,它们在费米子之间产生力,诸如引力和光。它们的基态能量是正的。超引力理论认为,每一种费米子和玻色子都具有其自旋比它大或小半个的"超伴侣"。

例如,光子(它是玻色子)的自旋为1。它的基态能量是正的。光子的超伴侣,光微子的自旋为1/2,使它成为费米子。所以其基态能量是负的。

在这种超引力方案中我们得到同等数目的玻色子和费米子。玻色子的基态能量处于天平正的一端,而费米子处于天平负的一端,基态能量就相互抵消了,因而排除了最大的无穷大。



粒子行为的模型

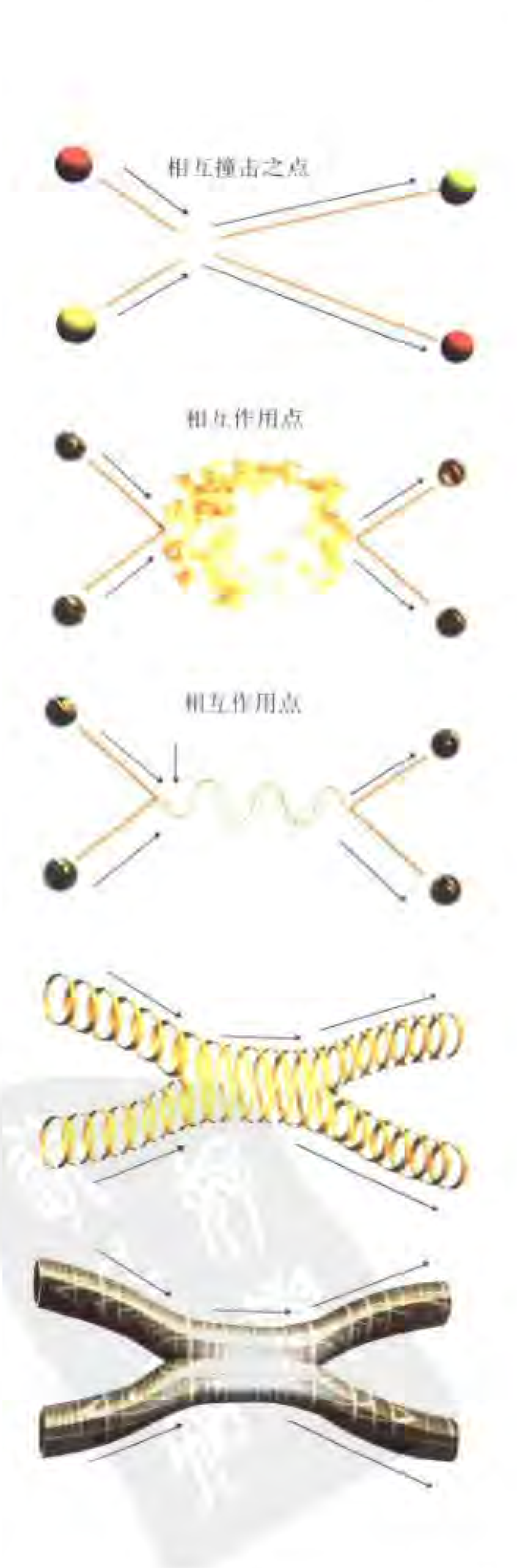
1 如果点粒子作为分立的像撞球那样的元素真实存在，那么当两个粒子碰撞时，它们的路径就会被偏离到两个新的轨道去。

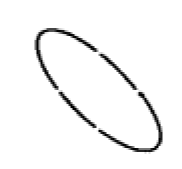
2 这是两个粒子相互作用所呈现的景象，虽然其效应更生动得多。

3 量子场论展示两个粒子，例如电子和它的反粒子正电子碰撞。在这个过程中，它们在一次能量迸发时短暂地相互湮灭，而且创生一个光子。光子再释放能量，产生了另一电子－正电子对。这看起来仍然像它们的路径仅仅被偏离到新的轨道去。

4 如果粒子不是零点而是一维的弦，在弦上振荡的圈环作为一个电子或正电子而振动，电子和正电子碰撞，那么在相互湮灭时创生了新的具有不同振动模式的弦。释放能量，它就分成两个沿着新的轨道连续的弦。

5 如果不把原先那些弦看成分立的动量，而把它们看成在时间中的连续的历史，那么所得到的弦就变成一个弦世界片。





右图 2.14 弦振动

在弦理论中，基本的对象不是占据空间单独一点的粒子，而是一维的弦。这些弦可有端点，或者它们可以自己连接成一个闭合圈环。

正如小提琴上的弦，弦理论中的弦支持一定的振荡模式，或者共振频率，其波长准确地配合两个端点之间的长度。

小提琴弦的不同共振频率导致不同的音阶，而弦的不同振动导致不同的质量和力的荷，它们被解释为基本粒子。粗略地讲，弦振动的波长越短，则粒子的质量越大。

是平坦而不是弯曲的时空中去消除物质场和杨－米尔斯场的无穷大。但是把它推广到通常数和格拉斯曼维的弯曲的情形是很自然的事。这就导致一些所谓超引力的理论，它们分别具有不同数目的超对称。超对称的一个推论是每一种场或粒子应有一个其自旋比它大或小半个的“超伴侣”(图 2.12)。

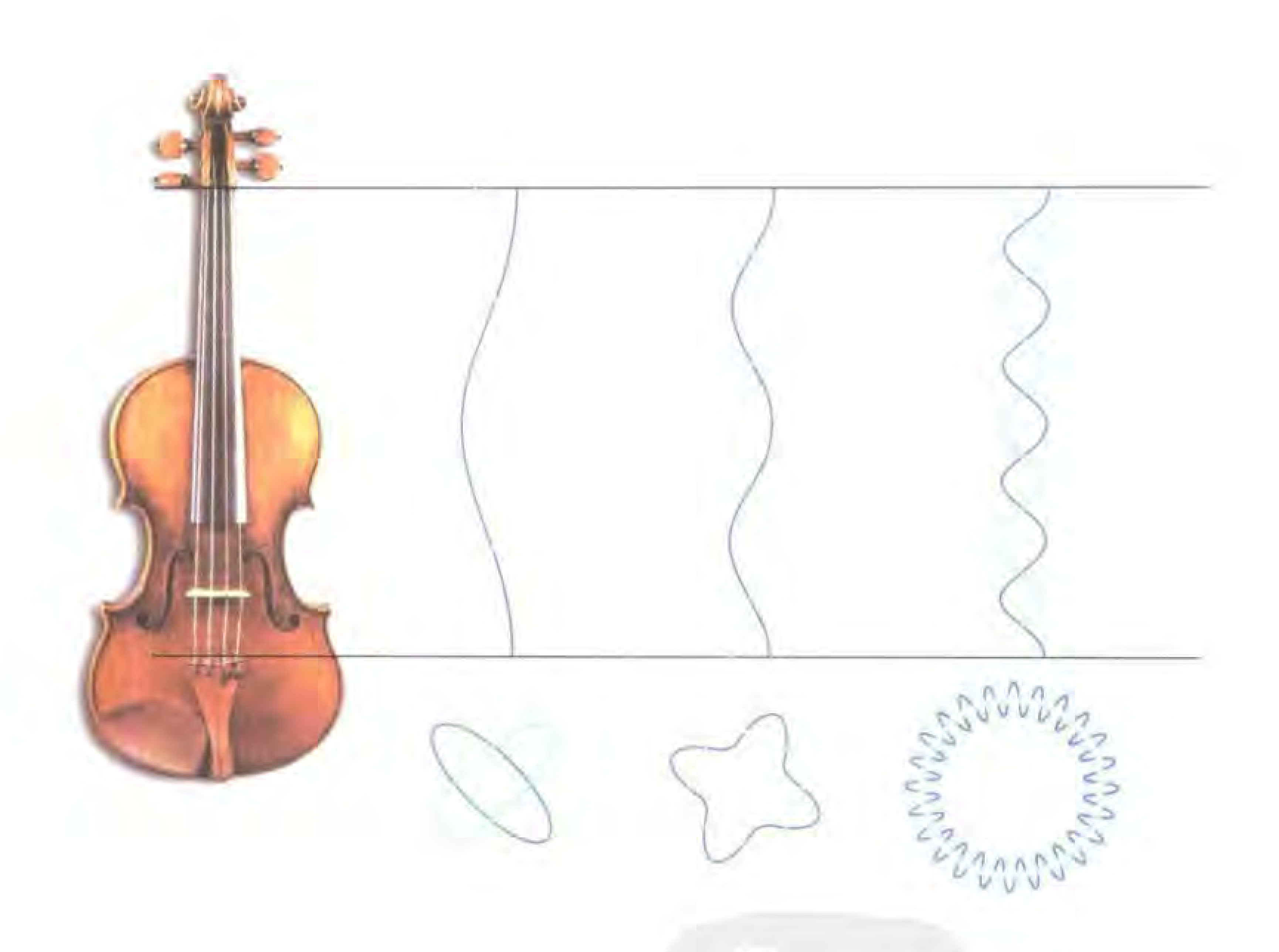
玻色子，也就是其自旋为整数(0,1,2 等)的场的基态能量是正的。另一方面，费米子，也就是其自旋为半整数(1/2,3/2 等)的场的基态能量是负的。因为存在相等数目的玻色子和费米子，超引力理论中的最大的无穷大就被抵消了(见 50 页，图 2.13)。

或许还遗留下更小的但是仍然无限的量的可能性。无人有足够的耐心，去计算这些理论究竟是否完全有限。人们认为这要一名能干的学生花费 200 年才能完成，而且你何以得知他是否在第二页就犯错误了？直到 1985 年大多数人仍然相信，最超对称的超引力理论可避免无穷大。

然后时尚突然改变。人们宣称没有理由期望超引力理论可以避免无穷大，而这意味着它们作为理论而言具有致命的缺陷。相反地，人们宣称称为超对称弦理论是仅有的把引力和量子理论合并的方法。弦，正如它们日常经验中的同名物，是一维的延展的物体。它们只有长度。在弦理论中弦在时空背景中运动。弦上的涟漪被解释为粒子(图 2.14)。

如果弦除了它们通常数的维外，还有格拉斯曼维，涟漪就对应于玻色子和费米子。在这种情形下，正的和负的基态能就会准确对消到甚至连更小种类的无穷大都不存在。人们宣布超弦是 TOE，也就是万物的理论。

未来的科学史家将会发现，去描绘理论物理学家中的思潮的起伏是很有趣的事。在好些年里，弦理论至高无



上，而超引力只能作为在低能下有效的近似理论而受到轻视。限定词"低能"尤其晦气，尽管此处低能是指其能量比在TNT爆炸中粒子能量的一百亿亿倍更低的粒子。如果超引力仅仅是低能近似，它就不能被宣布为宇宙的基本理论。相反地，五种可能的超弦理论中的一种被认为是基本理论。但是五种弦理论中的哪一种描述我们的宇宙呢？还有，在超出弦被描绘成具有一个空间维和一个时间



维的通过平坦时空背景运动的面的近似时，弦理论应如何表述呢?难道弦不使背景时空弯曲吗?

1985 年后，弦理论不是完整的图像这一点逐渐清晰了。一开始，人们意识到，弦只不过是延展成多于一维的物体的广泛族类中的一员。保罗·汤森，他正如我一样是剑桥的应用数学和理论物理系的一个成员，他关于这些东西做了许多基本研究，将这些东西命名为“p－膜”。一个 p－膜在 p 方向上有长度。这样 p＝1 的膜是弦，p＝2 的膜是面或者薄膜，等等(图 2.15)。似乎没有理由对 p＝1 的弦的情形比其他可能的 p 值更宠爱。相反地，我们应该采用 p－膜的民主原则：所有 p－膜都是生来平等的。

在十或者十一维的超引力理论的方程中可以找到所有 p－膜的解。十或十一维听起来不太像我们体验的时空。人们的观念是，其余的六或七维被弯卷成这么小，小到我们觉察不到；我们只知悉剩下的四维宏观的几乎平坦的维。

我应该说，对于相信额外的维，我本人一直犹豫不决。但是，对于我这样的一名实证主义者而言，“额外维的确存在吗?”的问题是没有意义的。人们最多只能问：具有额外维的数学模型能很好地描述宇宙吗? 我们还没有任何不用额外维便无法解释的观测。然而，我们在日内瓦的大

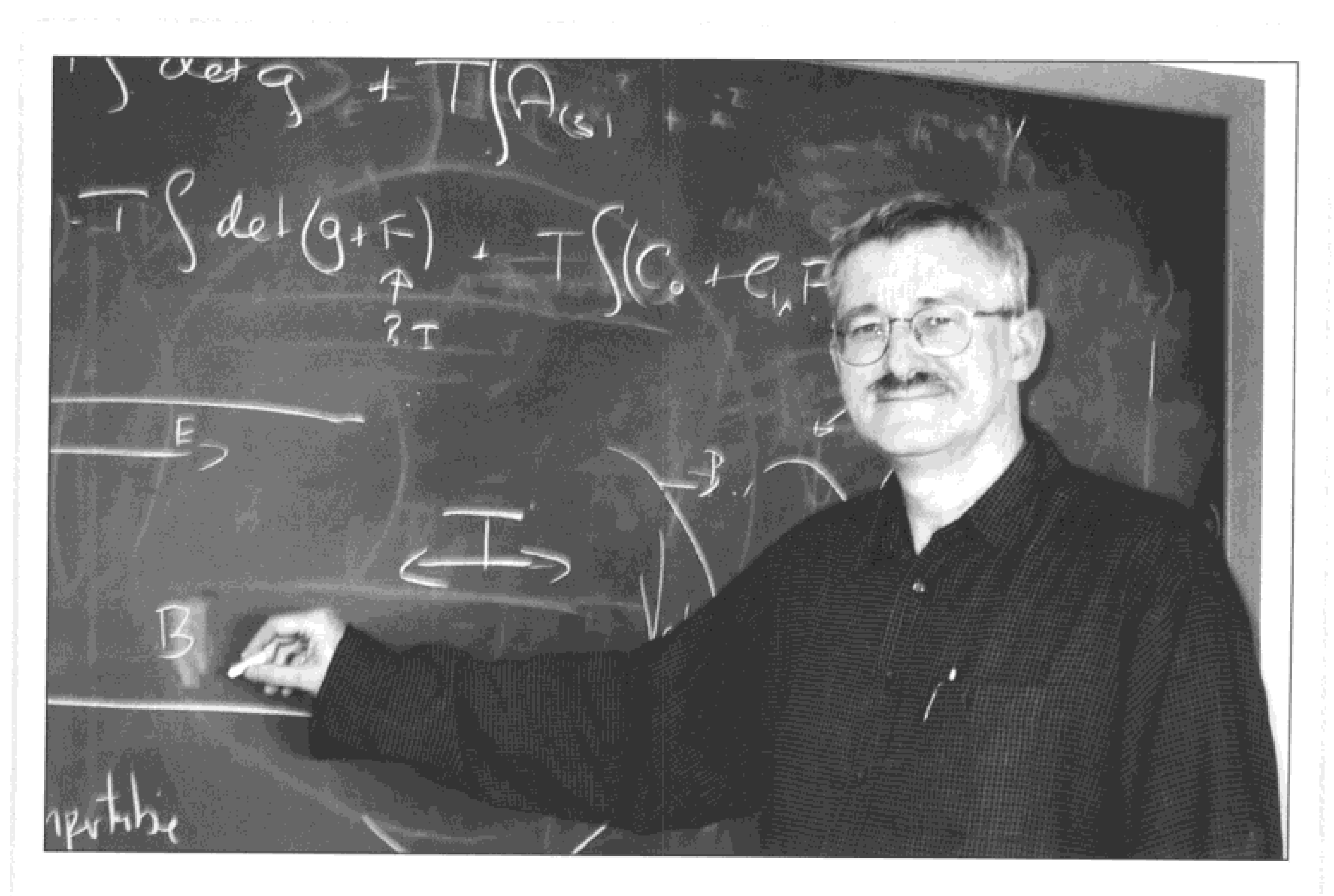
图 2.15 p－膜

p－膜是在 p－维延展的物体。其中特殊情形是弦 p＝1和膜 p＝2，但在十维或十一维时空中可能有更大值的 p。p－维中的一些或全部经常被卷曲起来，像一个圆环似的

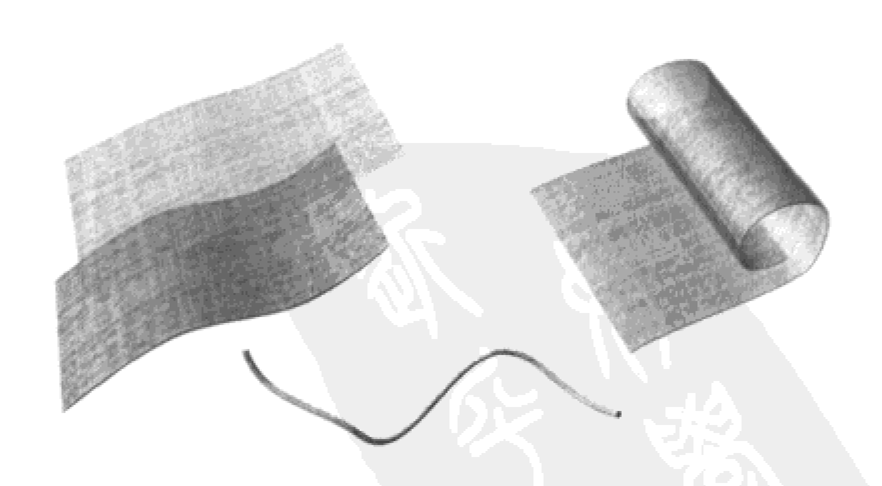


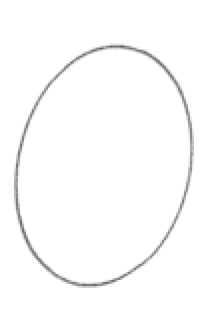
我们认为这些真理是自明的：所有 p－膜都是生来平等的!

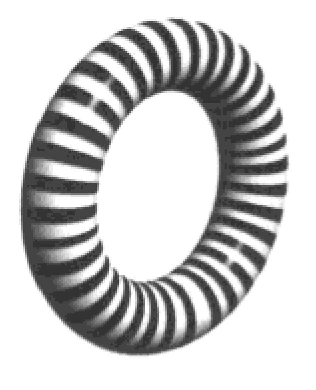




保罗·汤森的照片，p－膜的书呆子





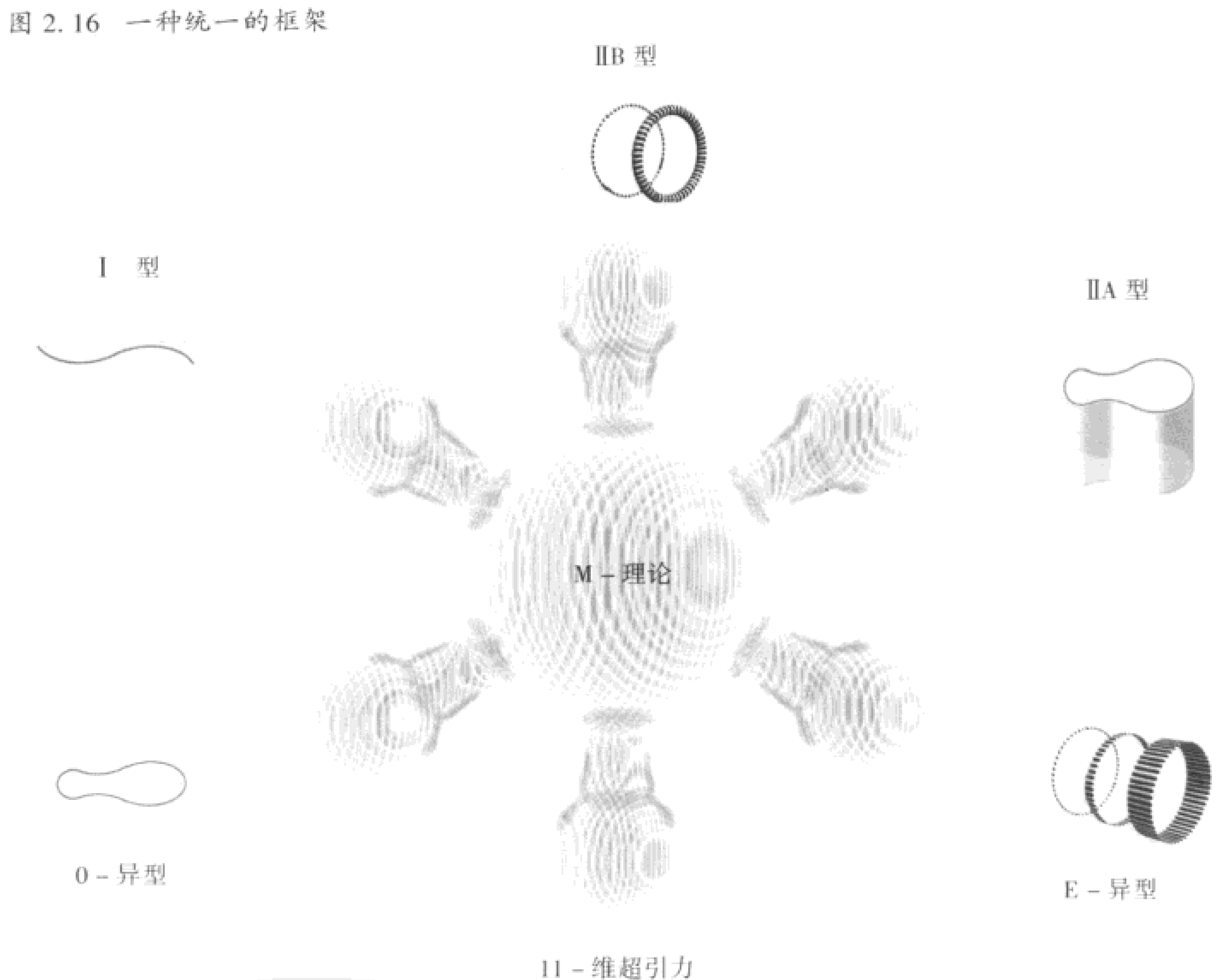


我们宇宙的空间结构既具有延展的也具有卷曲的维。如果膜被卷曲起来则能看得更清楚。

一个1－膜或者卷曲的弦。

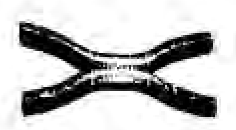
一个卷曲成圆环的2－膜片。

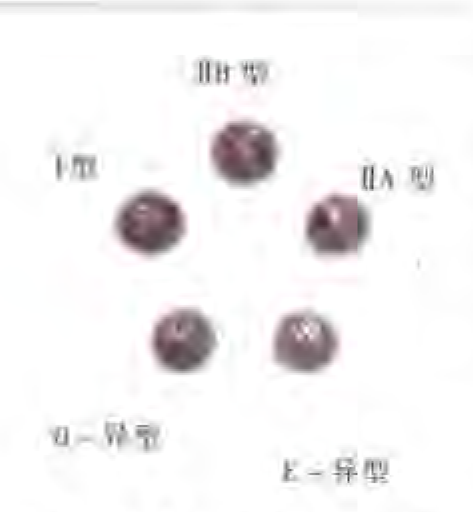
图 2.16　一种统一的框架





存在一个所谓的对偶性的关系网，它把所有五种弦理论以及十一维超引力连接在一起。对偶性暗示，不同的弦理论只不过是同一基本理论的不同表述，这个基本理论已被命名为 M－理论。





90年代中期之前找到5种不同的弦理论，它们相互分离而且没有联系。



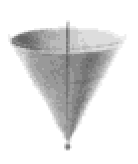
M－理论在一个单独的理论框架中把五种弦理论统一起来，但是人们还不能理解它的许多性质。

型强子碰撞机存在观察到它们的可能性。但是，使包括我在内的许多人信服的，必须认真地接受具有额外维的模型的理由是，在这些模型之间存在一种所谓对偶性的意外的关系之网。这些对偶性显示，所有这些模型在本质上都是等效的；也就是说，它们只不过是同一基本理论的不同方面，这个基本理论被叫做M－理论。怀疑这些对偶性之网是我们在正确轨道上的征兆，有点象相信上帝把化石放在岩石中去是为了误导达尔文去提出生命演化的理论。

这些对偶性表明，所有五种超弦理论都描述同样的物理，而且它们在物理上也和超引力等效(图2.16)。人们不能讲超弦比超引力更基本，反之亦然。人们宁愿说，它们是同一基本理论的不同表述，对在不同情形下的计算各有用处。因为弦理论没有任何无穷大，所以用来计算一些高能粒子碰撞以及散射事件很方便。然而，在描述非常大量数目的粒子的能量如何弯曲宇宙或者形成束缚态，譬如黑洞时没有多大用处。对于这些情形，人们需要超引力。超引力基本上是爱因斯坦的弯曲时空的理论加上一些额外种类的物质。这正是我以下主要使用的图像。

为了描述量子理论如何赋形于时间和空间，引进虚时间的观念是有助益的。虚时间听起来有点像科学幻想，但其实是很好定义的数学概念：它是用所谓的虚数度量的时间。人们可以将诸如1，2，－3，5等等通常的实数想成对应于从左至右伸展的一根线上的位置：零在正当中，正实数在右边，而负实数在左边(图2.17)。

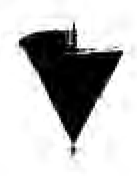
虚数对应于一根垂直线上的位置：零又是在中点，正虚数画在上头，而负虚数画在下面。这样虚数可被认为与通常的实数夹直角的新型的数。因为它们是一种数学的构造物，不需要实体的实现；人们不能有虚数个橘



虚时间中的历史

实时间中的历史

图 2. 17
人们可以建立一个数学模型，在这模型中存在和通常的实时间成直角的虚时间方向。该模型的规则是，按照在实时间中的历史确定在虚时间中的历史，反之亦然。





子或者虚数的信用卡账单(图 2.18)。

图 2.18
虚数是一种数学的构造物。你不会有虚数的信用卡账单。

人们也许会认为，这意味着虚数只不过是一种数学游戏，与现实世界毫不相干。然而从实证主义哲学观点看，人们不能确定何为真实。人们所能做的只不过是去找哪种数学模型描述我们生活其中的宇宙。人们发现牵涉到虚时间的一种数学模型不仅预言了我们已经观测到的效应，而且预言了我们尚未能观测到但因为其他原因仍然坚信的效应。那么何为实何为虚呢?这个差异是否仅存在于我们的头脑之中呢?

爱因斯坦经典(也就是非量子)广义相对论把实时间和三维空间合并成四维时空。但是实时间方向和三个空间方向可被识别开来；一位观察者的世界线或历史总是在实时间方向增加(也就是说，时间总是从过去运动到未来)，但是它在三维空间的任何方向上可以增加或者减少。换言之，人们可以在空间中而非时间中颠倒方向图 2.19)。

另一方面，因为虚时间和实时间夹一直角，它的行为犹如空间的第四个方向。因此，它比通常的实时间的铁轨



时间方向　　观察者历史　　光锥

图 2.19
在经典广义相对论的实时时空中，因为时间只沿着一位观察者的历史增加，不像空间方向那样可以沿着那历史增加或者减小，时间就和空间方向区分开来。另一方面，量子理论的虚时间方向正像另一个空间方向，所以它能增加或者减小。

具有更丰富多彩的可能性。铁轨只可能有开端或者终结或者绕着圆圈。正是在这个虚的意义上，时间具有形态。

为了领略一些可能性，考虑一个虚时间的时空，那是一个像地球表面的球面。假定虚时间是纬度（见 61 页，图 2.20）。那么宇宙在虚时间中的历史就从南极启始。这样，"在开端之前发生了什么"的诘问就变得毫无意义。这样的时间根本无法定义，恰如不存在比南极更南的点一



图 2.20 虚时间

在一个球面的虚时空中，虚时间方向可代表离开南极的距离。随着人们往北运动，离南极等距离的纬度圈变大，这对应着宇宙随虚时间的膨胀。宇宙在赤道处达到最大尺度，然后随着虚时间的增加而重新收缩于北极处的单独一点。尽管宇宙在两极尺度为零，这些点不是奇点，正如地球表面上的北南两极是完全规则的点。这暗示着，宇宙在虚时间中的起源可为时空中的规则的点。



虚时间作为纬度



图 2.21
在一个球面的时空中的虚时间方向也可对应于经度，而非纬度。因为所有经线在北南两极相遇，时间在两极停滞不前，虚时间的增加使人们留在同一点，正如在地球的北极上向西走的人们仍然留在北极上一样。

虚时间作为经度
它们在北南两极相遇



信息被复原

信息落入黑洞

一个黑洞的熵——或者内部状态的数目——的面积公式暗示，有关落进黑洞的东西的信息可以像在唱片上一样被储存，当黑洞蒸发时再放出来。



样。南极是地球表面上完全规则的点，相同的定律在那里正如在其他点一样成立。这暗示着，宇宙在虚时间中的开端可以是时空的规则的点，而且相同的定律在开端处正如在宇宙的其他地方一样成立（宇宙的量子起源和演化将在下一章中讨论）。

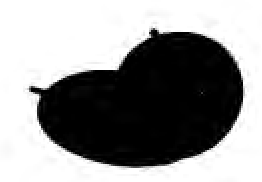
另一种可能的行为是可以把虚时间当作地球上的经度来阐明。所有经线都在北极和南极相遇（见61页，图2.21）。这样时间在那里静止，这是在这样的意义上来讲的，即虚时间或经度的增加，让人们停留在同一点。这和在一个黑洞视界上通常时间显得静止的方式非常相似。我们已经认识到这种实和虚时间的静止（两者都静止或者都不静止）意味着时空具有温度，正如我在黑洞情形下所发现的那样。黑洞不仅有温度，它的行为方式似乎还表明它具有称作熵的量。熵是黑洞内部状态（可在其内部构造的方式）的数目的度量，这是具有给定的质量、旋转和电荷的黑洞允许的所有内部状态。作为黑洞外面的观察者只能观测到黑洞的这三种参数。黑洞的熵可由我于1974年发现的一个非常简单的公式给出。它等于黑洞视界的面积：视界面积的每一基本单位都存在关于黑洞内部状态的一比特的信息。这表明在量子引力和热力学之间存在一个深刻的联系。热力学即热的科学（其中包括熵的研究）。它还暗示，量子引力能展示所谓的全息性（见65页，图2.22）。

有关一个时空区域内的量子态的信息可以某种方式被编码在该区域的少两维的边界上。这就像全息术把三维的影像携带在二维的表面上的方法。如果把量子引力和全息原理相合并，这也许意味着我们能跟踪发生于黑洞之内的东西。如果我们能够预言来自黑洞的辐射，这一

$$S = \frac{Akc^3}{4\hbar G}$$

黑洞熵公式

A 黑洞事件视界的面积
$\hbar$ 普朗克常数
k 玻尔兹曼常数
G 牛顿引力常数
c 光速
S 熵





甚至二维全息板上的微小碎片都包含重建苹果整个三维像的足够信息。

点则是重要的。如果我们不能做到，我们将不能像原先以为的那样充分地预言将来。这将在第四章中讨论。我们在第七章中将再次讨论全息学。看来我们也许生活在一张3-膜，即一个四维(三维空间加一维时间)面上。它是五维区域的边界，而其余的维被卷曲得非常小。膜上的世界的态负载着发生在五维区域内一切的密码。

全息原理

围绕黑洞的视界表面积是黑洞熵的测度的证明导致人们建议，任何闭合空间区域的最大熵永远不能超过其外接表面积的四分之一。由于熵正是包含在一个系统中的总信息的测度，这便暗示，在和三维世界中的所有现象相关联的信息能被存储在它的二维边界上，正如一个全息像一样。在一定的意义上讲，这个世界是二维的。

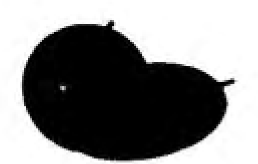


图2.22 全息术基本上是波模式干涉现象。当从一个单独激光束的光被分成分离的两束(**a**)和(**b**)时产生全息像。其中一束(**b**)从物体(**c**)反射到一个感光板(**d**)上。另一束(**a**)通过一个透镜(**e**)并且和(**b**)的反射光相遇,在板上产生干涉模式。

当一束激光透射过该显影过的感光板时,一个原先物体的完整三维像就会出现。一位观察者可在这个全息像周围改变位置,他能够看到从正常的照片看不到的所有隐藏的表面。

左面的感光板的两维表面和正常的照片不同,具有令人吃惊的性质,即它表面的任何微小碎片都包含有重建整个像所需要的全部信息。

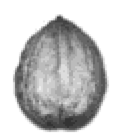


第三章

果壳中的宇宙

宇宙具有多重历史，每一个历史都是由微小的硬果确定的。







即便把我关在果壳里，
仍然自以为无限空间之王
……

——莎士比亚，
哈姆雷特，第二幕，第二场

哈姆雷特也许是想说，虽然我们人类的肉体受到许多限制，但是我们的精神却能自由地探索整个宇宙，甚至勇敢地闯入连《星际航行》都畏缩不前之处——噩梦不再纠缠的话。

宇宙究竟是无限的，或者仅仅是非常浩渺的呢？它是永恒存在的，或者仅仅是年代久远的呢？我们有限的思维何以理解无限的宇宙？甚至仅仅有这种企图是否就已经过于自信？我们是否冒着普罗米修斯命运的风险？在经典的神话中，他为了人类的用火从宙斯处盗取火种，因为愚勇而受惩罚，他被链锁在岩石上，让鹰啄食他的肝脏。



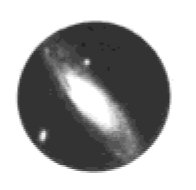
上图：普罗米修斯。厄特鲁里亚瓶饰绘画，公元前6世纪。

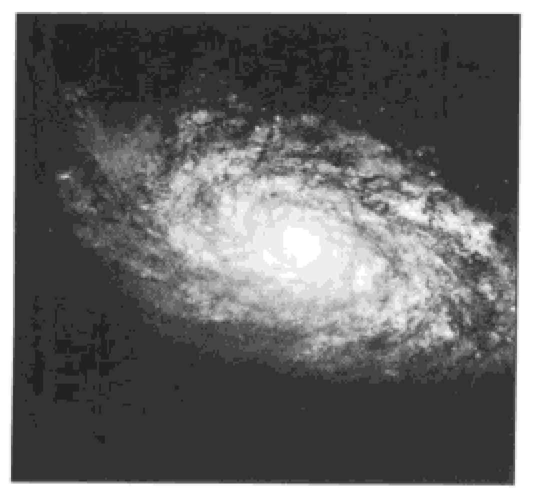
左图：派遣的航天飞机正在改善哈勃空间望远镜的透镜和镜子。在下面可以看到澳大利亚。

尽管这些警诫的传说，我仍然相信，我们能够而且应该试图去理解宇宙。我们在这方面已有了显著的进展，尤其是在前几年。当然，我们还未得到完整的图像，但已为期不远。

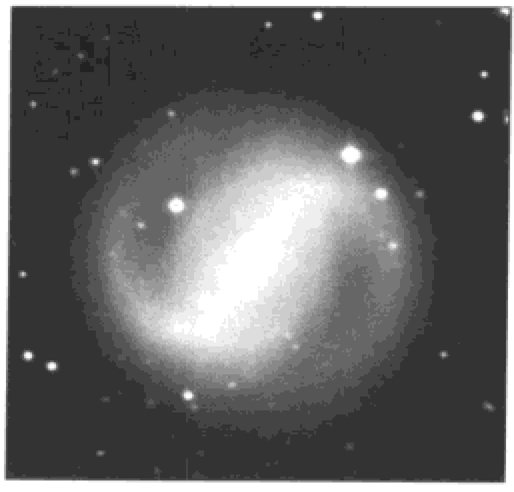
空间的最明显之处是它无限地向外延伸。现代仪器证实了这一点，譬如哈勃望远镜允许我们探测太空深处。我们所看到的是各种形状和尺度的数以亿万计的星系(见70页、图3.1)。

每个星系包含难以计数的亿万个恒星，其中许多恒星还被行星所环绕。我们生活在围绕着一个恒星公转的行星之上，而这个恒星位于螺旋形银河系的外臂





螺旋星系 NGC4414



棒旋星系 NGC4314



椭圆星系 NGC147

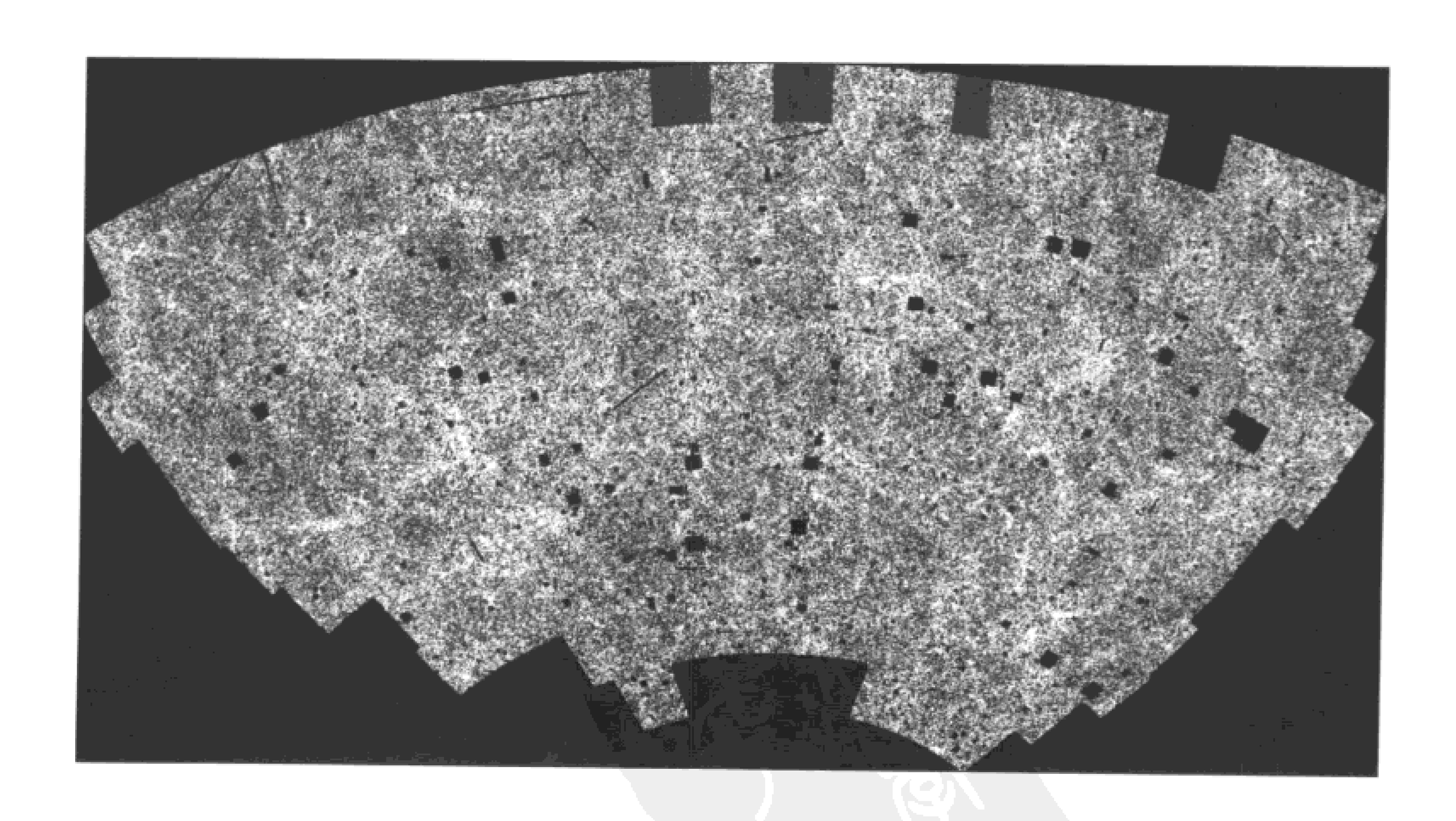


图 3.1　当我们观察宇宙的深处，我们看到亿万个星系。星系可具有不同形状和尺度，它们既可以是椭圆状的，也可以是螺旋状的，就像我们自身的银河系那样。



上。螺旋臂上的尘埃遮住了我们在银河系平面上的宇宙视线，但是我们在该平面的每一边的方向圆锥中的视线都非常清晰，而且我们能够画出遥远星系的位置(图 3.2)。我们发现星系大体均匀地分布于整个太空，有一些局部的聚集和空洞。星系密度在非常大的距离外显得有些下降，但这也许是因为它们如此遥远而黯淡，以至于我们看不见。我们所能说的是，宇宙在空间中永远延伸出去(见 72 页，图 3.3)。

图 3.2
我们的行星地球(E)围绕着位于螺旋的银河系外部区域的太阳公转。螺旋臂中的恒星尘埃挡住了我们在星系面上的视线，但是我们在该平面的任一边都有一个清晰的视域。

尽管宇宙似乎在空间的每一位置上都很相同，它肯定是随时间而变化的。这一点是直到 20 世纪的早期才被意识到。在此之前，人们认为，宇宙在本质上是时间不变的。它也许存在了无限长的时间，但是这会导致荒谬的结论。如果恒星已经辐射了无限长的时间，那么它们就会把宇宙加热到和它们相同的温度。因为每一道视线都会要么终结于恒星的表面，要么终结于被加

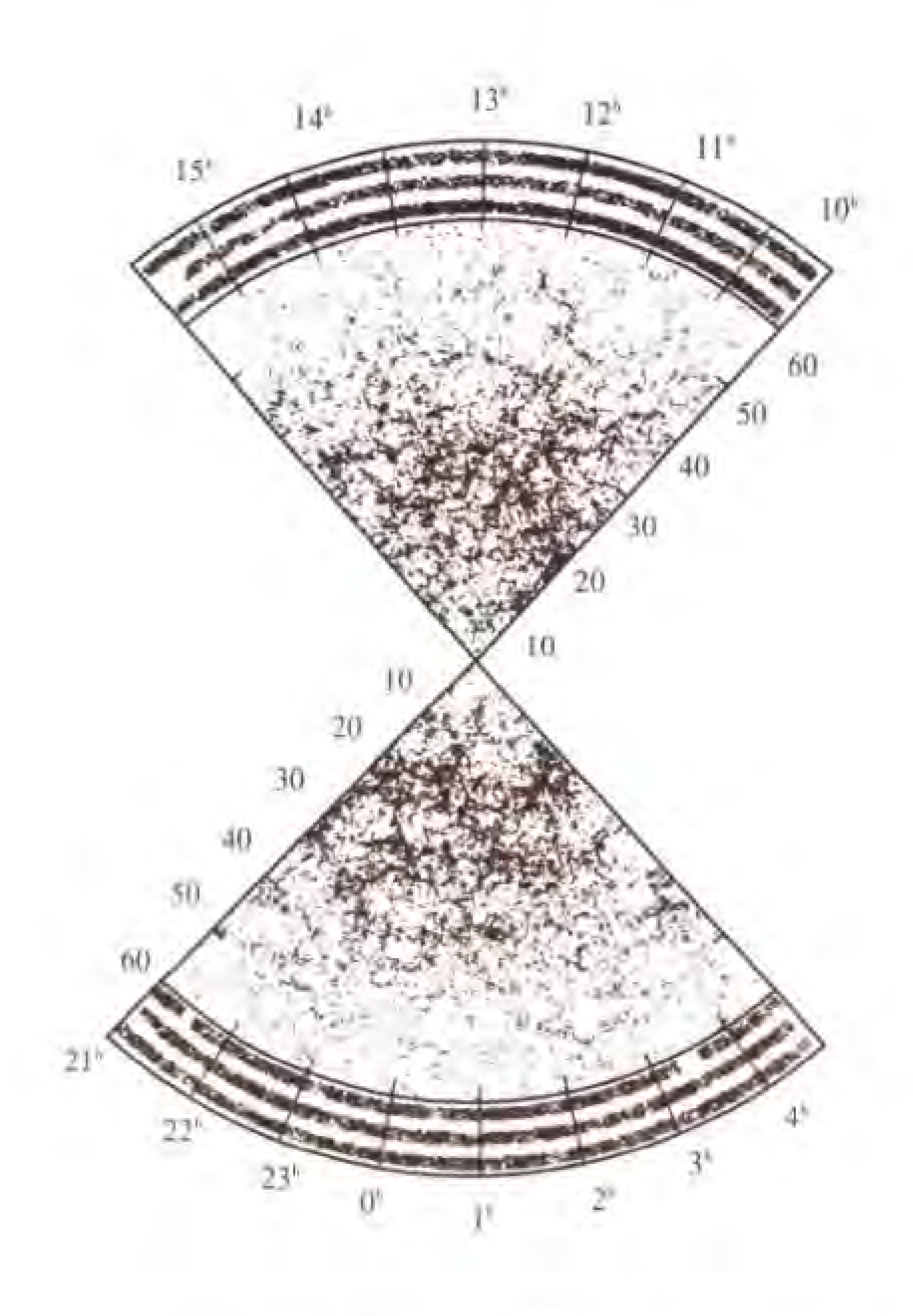


图 3.3
我们发现，除了一些局部的聚集外，星系大体均匀地分布于整个空间。

热至和恒星一样炽热的尘埃云团之上，所以甚至在夜晚，整个天空都会和太阳一样明亮(图 3.4)。

我们所有人都进行过夜空是黑的观察，这是非常重要的。它意味着宇宙不能以我们今天看到的状态存在了无限久的时间。过去一定发生过某些事情，使得恒星在有限的过去时刻点亮，这意味着从非常遥远恒星来的光线尚未到达我们这里。这就解释了夜空为何不在每一个方向发光。

如果恒星仅仅是永久地待在那里，为何它们在几十亿年前忽然点亮呢？是什么钟通知它们发亮的瞬间

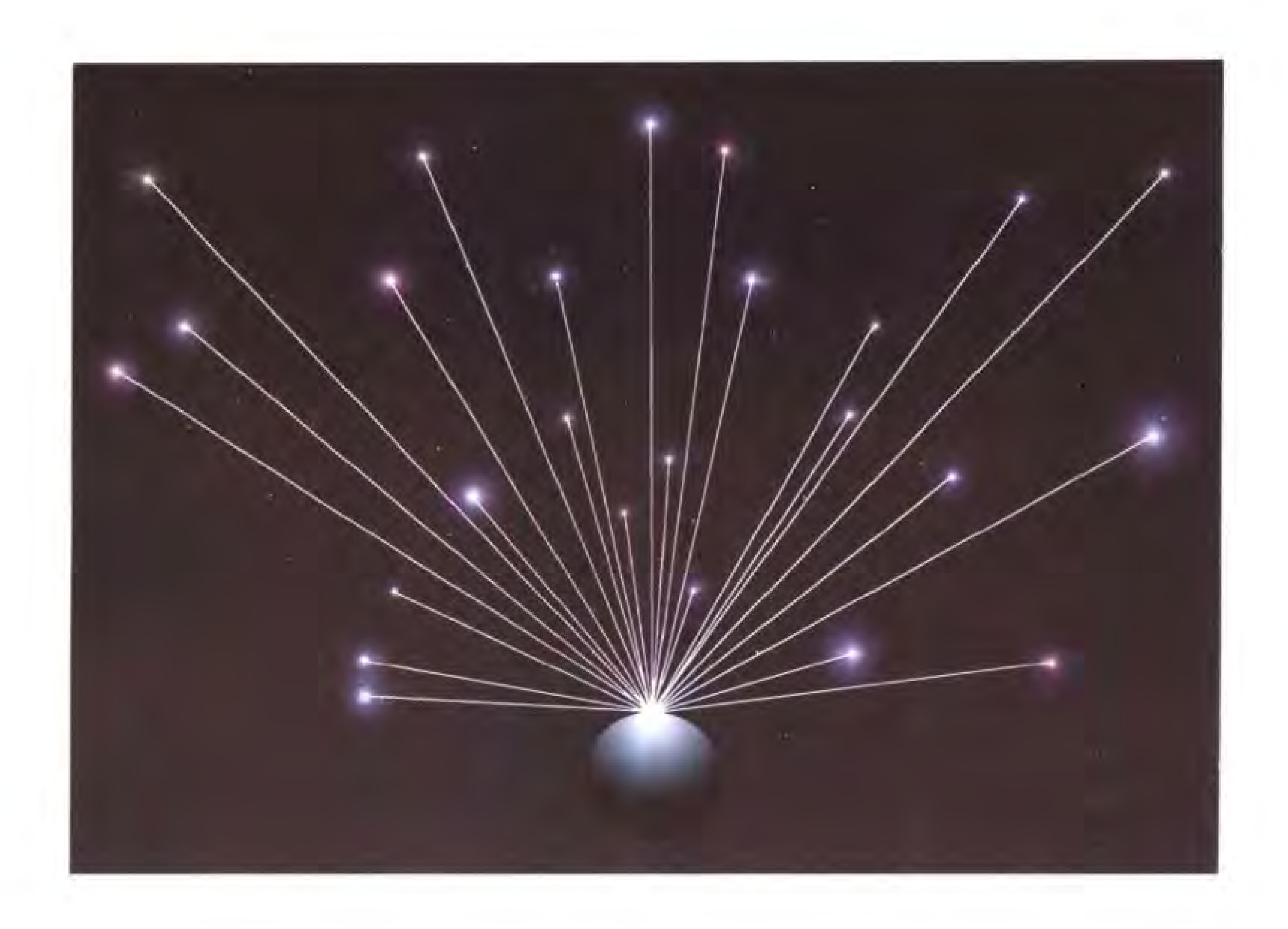
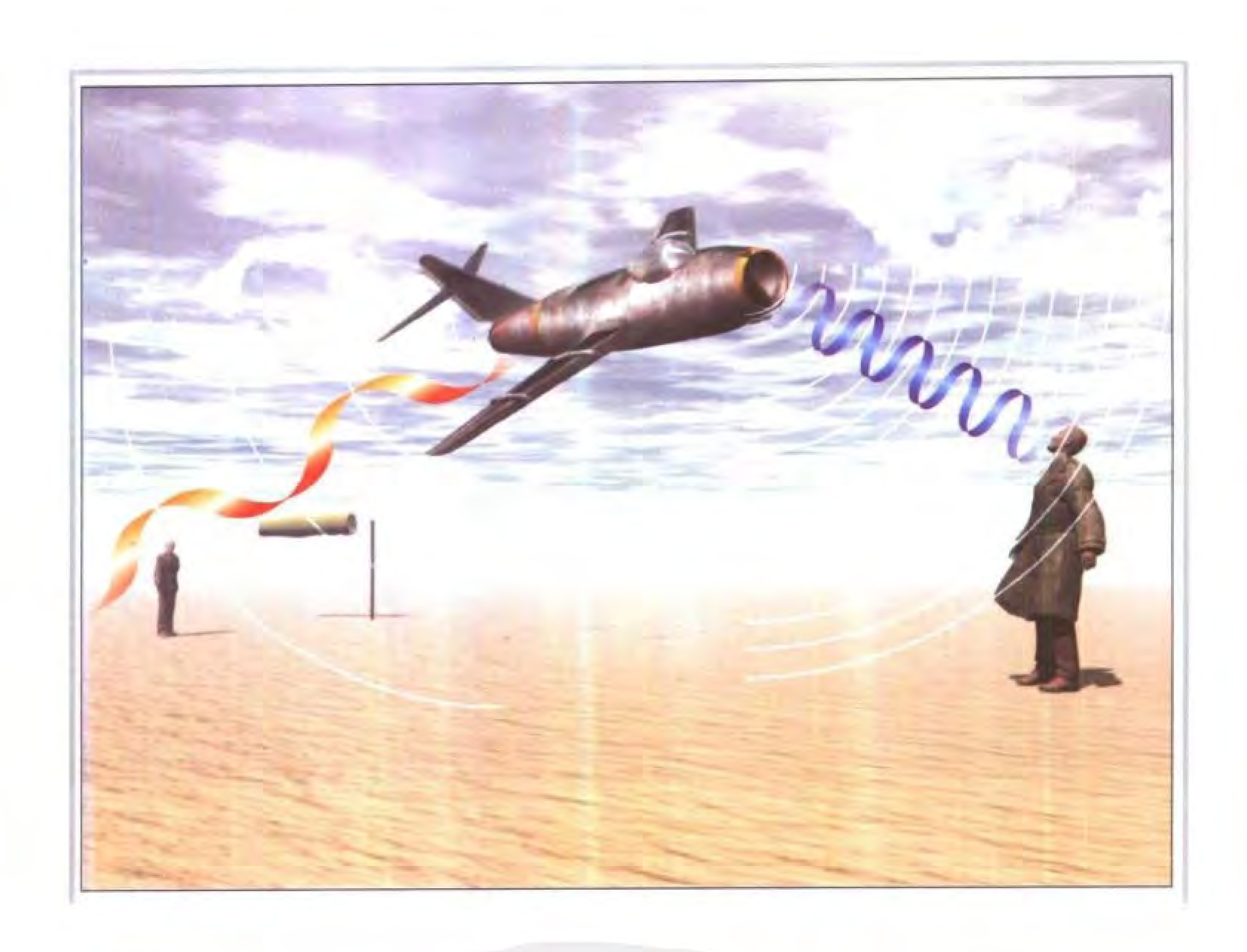


图 3.4
如果宇宙是静态的，而且在每一方向都是无限的，那么每根视线都会终结于一个恒星上，这就使得夜空和太阳一样明亮

呢？正如我们看到过的，这个问题使那些哲学家，例如伊曼努尔·康德陷入迷思。他们相信，宇宙已经存在了无限久时间。但是对于大多数人而言，它和宇宙在仅仅几千年以前从和现在非常相同的初始状态下创生的观念相一致。

然而，20 世纪 20 年代韦斯托·史里弗和埃德温·哈勃的观测开始偏离这种观念。1923 年哈勃发现了许多称为星云的黯淡的光斑，实际上是其他星系，正像我们太阳的但在遥远距离之外的恒星的巨大集团。它们之所以显得这么微小和黯淡，其距离一定非常遥远，甚至



多普勒效应

称作多普勒效应的速度和波长之间的关系是一种日常经验。

聆听从头顶飞过的飞机；当它趋近我们时，其引擎的音调升高，而当它离开并消失时，其音调降低。

高音调对应于更短波长（相邻波峰之间的距离）和高频率（每秒钟的波动数目）。

这是因为在飞机向你飞来时，当它发射下一个波峰时，它离你更近，减小了波峰之间的距离。类似地，当飞机飞离时，其波长增大，而且你感知的音调变低。



连光线都要花费几百万甚至几十亿年才能到达我们这里。这表明，宇宙的启始不可能发生在区区几千年以前。

但是哈勃发现的第二桩事情甚至更加非凡。天文学家们已经学会，从分析来自其他星系的光线，可以测量它们是趋近还是远离我们运动(图 3.5)。使他们大为惊奇的是，他们发现，几乎所有的星系都运动离去。此外，它们距我们越远，则离开运动得越快。正是哈勃认识到这个发现的戏剧性含义：在大尺度上，每一个星系都从其余每个星系运动离去。宇宙正在膨胀(图 3.6)。

宇宙膨胀的发现是 20 世纪的伟大的智力革命之一。它完全出乎意外，而且彻底改变了有关宇宙起源的

图 3.5
多普勒效应对于光波也是正确的。如果一个星系和地球之间的距离保持不变，则光谱的特征线在正常的标准的位置出现。然而，如果星系离开我们运动，则波就被伸延或者拉长，而特征线就向红端移动(右边)。如果星系趋近我们运动，那么波就被压缩，而谱线就向蓝端移动(左边)。



我们邻居星系仙女座星云，由哈勃和史利弗测量。

史利弗和哈勃在1910～1930年间发现年代表

1912年——史利弗测量了来自四个星云的光，发现其中三个红移，而仙女座星云蓝移。他的解释是仙女座星云向着我们运动，而其他星云离开我们运动。

1912～1914年——史利弗又测量了12个星云。除了一个以外所有都红移。

1914年——史利弗在美国天文学会报告他的发现。哈勃听到这个报告。

1918年——哈勃开始研究星云。

1923年——哈勃确定螺旋星云（包括仙女座星云）是其他星系。

1914～1925年——史利弗和其他人一直测量多普勒位移。1925年的成绩是43个红移和2个蓝移。

1929年——哈勃和密尔顿·胡玛逊在继续测量多普勒位移，并且发现在大尺度上，每一个星系都从任何其余的星系退行后，宣布他们的发现，即宇宙正在膨胀。



讨论。如果星系正在相互运动离开，则它们在过去必然更加接近。我们从现在的膨胀率，可以估计它们在100至150亿年前必须非常接近。正如在上一章中描述的，罗杰·彭罗斯和我能够证明，爱因斯坦的广义相对论意味着，宇宙和时间本身有过一个在可怕的爆炸中的开端。这里提供了夜空为何黑暗的解释：没有恒星可以发光得比100至150亿年，也就是从大爆炸迄今的时间更久。

我们对如下观念熟视无睹，即事件总是由更早的事件引起，后者依序又是由比它还要早的事件引起。存在一个向过去延展的因果性之链。但是假定这条链有一开端，假定存在第一个事件，那么它的肇因又是什么呢？许多科学家不愿意面对这个问题。他们企图逃避它，



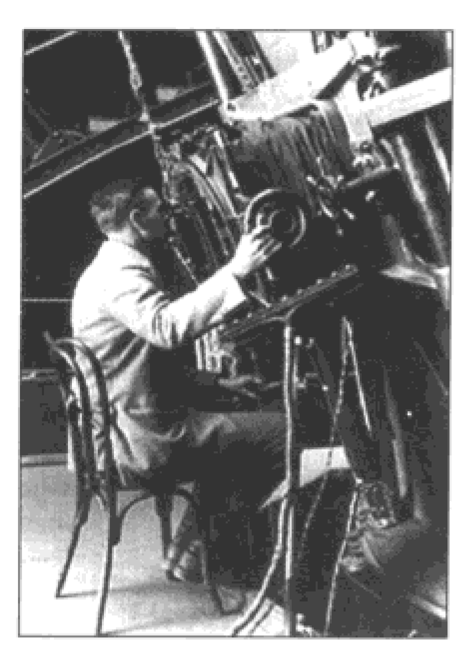


图 3.6

埃德温·哈勃于1930年使用100英寸的威尔逊山望远镜。

图 3.6　哈勃定律

埃德温·哈勃在分析了从其他星系来的光之后，在1920年代发现，几乎所有星系都离开我们而去，其退行的速度V和它们离开地球的距离R成正比，即 $V = H \times R$。

这一称作哈勃定律的重要观察确认了宇宙正在膨胀，其哈勃常数H为膨胀率。

下图显示星系红移的最近观测结果，在离开我们的极其巨大的距离下确证了哈勃定律。

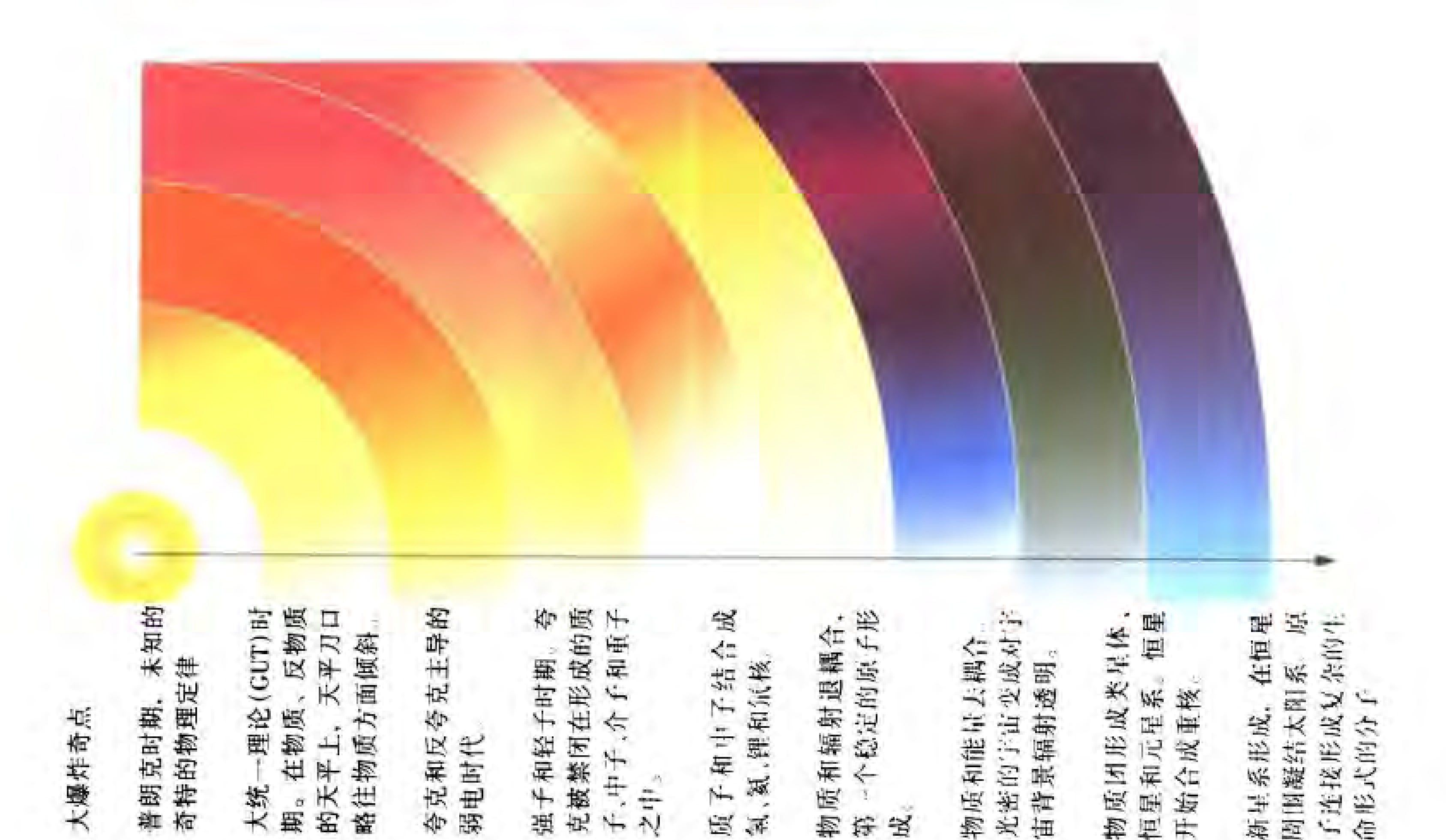
在图中大距离处的微小上扬表明，膨胀正在加速，这也许是由真空能量引起的。

26
24
22
20
18
16
14

星系离开我们的距离

0.02　0.05　0.1　0.2　0.5　1.0

星系离开我们运动的速度



热大爆炸

如果广义相对论是正确的，那么宇宙就在具有无限温度和密度的大爆炸奇点启始。随着宇宙的膨胀，辐射的温度降低。大约在大爆炸后的百分之一秒，温度为一千亿度，宇宙大多数成分为光子、电子和中微子(极轻的粒子)，和它们的反粒子，还有某些质子和中子。在以后的三分钟，当宇宙冷却至大约十亿度，质子和中子开始结合形成氦、氢和其他轻元素的核。

几十万年以后，当温度降低至几千度，电子就缓慢到这种程度，轻核能够将它们捕获而形成原子。然而，构造我们的诸如碳和氧的更重元素，直到十亿年后才在恒星的中心燃烧氦而形成。

1948 年科学家乔治·伽莫夫在一篇和拉夫·阿尔法合作的论文中首先提出宇宙紧致的热的早期的这一图像。他们在该论文中作出惊人的预言，从这一非常热的早期阶段的辐射迄今还应该留在周围。1965 年物理学家阿诺·彭齐亚斯和罗伯特·威尔逊观察到宇宙微波背景辐射，证实了他们的预言。



或者像俄国人那样宣布宇宙没有开端，或者坚持说宇宙的开端不属于科学王国的范畴，而是属于形而上学或宗教。依我看来，这不是任何真正的科学家应该采取的立场。如果科学定律在宇宙的开端处失效，它们不也可以在其他时间失败吗？如果定律只能有时成立则不能称之为定律。我们必须试图在科学的基础上理解宇宙的开端。它也许是超过我们能力之外的任务，但是我们至少应该进行尝试。

彭罗斯和我证明的定理指出，宇宙必须有一开端，这些定律并没有对开端的性质给出很多信息。它们指出，宇宙从一个大爆炸启始。在大爆炸处整个宇宙和其中的一切都被挤压到一个无限密度的单独的点中。爱因斯坦的广义相对论在这一点失效，所以不能被用来预言宇宙是如何启始的。很显然，人们面临的局面是，宇宙起源的问题属于科学范畴之外。

科学家不应该对这个结论满意。正如在第一章和第二章中指出的，广义相对论在大爆炸邻近失效的原因是，它没有和不确定性原理相合并。爱因斯坦基于上帝不玩弄骰子的论断反对量子理论中的这个随机元素。然而所有证据表明，上帝完全是一名赌徒。人们可以将宇宙认为是一个庞大的赌场，在每一个场合骰子都在滚动或者轮子都在旋转（图 3.7）。因为在你每回投掷骰子或者转动轮子之际都有输钱的风险，你也许



会认为开赌场是一种非常冒险的营生。但在非常多次的赌博之后，虽然不能预言任何特定赌博的结果，却能预言得失的平均结果（图 3.8）。赌场的经营者保证概率平均的结果对他们有利。这就是为什么赌场的经营者如此富裕。你赢他们的仅有机会是把你所有的钱押下去掷几回骰子或者转几回赌轮。

宇宙的情景也是一样。当宇宙尺度很大，正如它今天这样时，骰子被投掷的次数极为巨大，其平均结果就会得出某种可预见的东西。这就是为何在大系统经典定律有效的原因。但是，当宇宙尺度非常微小时，正如它在邻近大爆炸的时刻，骰子被投掷的次数很少，而不确定性原理则非常重要。

因为宇宙不停地滚动骰子，看看下一步还会发生什么，它就不像人们以为的那样仅仅存在一个历史。相反地，宇宙应该拥有所有可能的历史，每种历史各有其概率。宇宙必须有这样的一种历史，伯利兹囊括了奥林匹克运动会的所有金牌，虽然也许其概率很小。

宇宙具有多重历史的思想听起来像是科学幻想，但是它现在被当做科学事实而广被接受。正是理查德·费因曼提出了这个思想，他不仅是一位伟大的物理学家，也是一位有趣的人物。

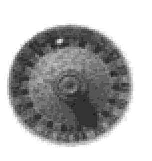
我们现在所从事的是把爱因斯坦的广义相对论和费因曼的多重历史的思想合并成一个完备的统一理论，该理论将描述在宇宙中发生的一切事物。如果我们知道宇宙的历史是如何开始的话，这个统一理论就使我们能够计算宇宙将如何发展。但是统一理论自身并不告诉我们宇宙如何开始，或者说初始条件是什么。为此，我们需要所谓的“边界条件”，也就是告诉我们在宇宙的前沿，或者在空间和时间的边缘上发生什么的规则。

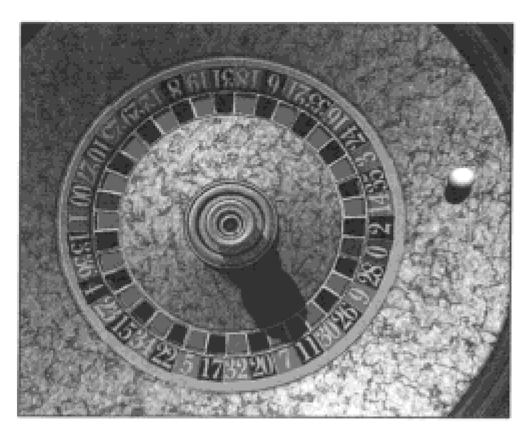
如果宇宙的前沿只不过是在空间和时间的正常点

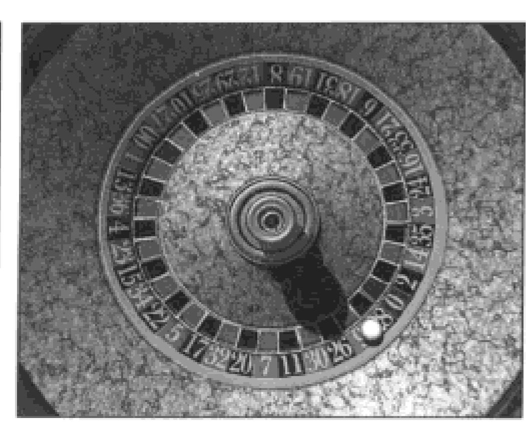


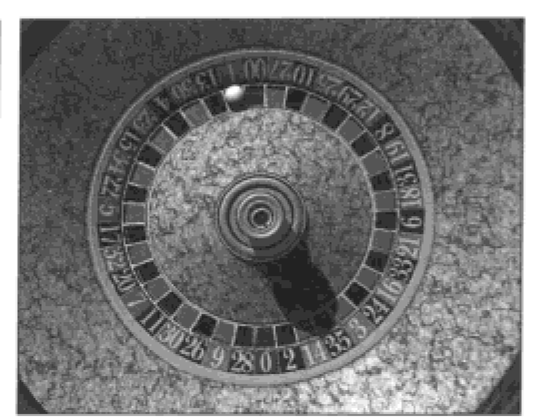
图 3.7 和右图 3.8

如果一位赌客向红的方面下赌多次掷骰子，由于单次掷骰子的结果都被平均了，人们可以相当精确地预言它的回报。
另一方面，任何特定的赌博的结果是不可预言的。









52.6% 47.4%

概率

结果

−1 +1

向红的方面下一次赌

概率

结果

−10 −8 −6 −4 −2 0 +2 +4 +6 +8 +10

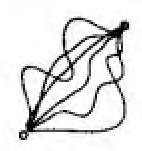
向红的方面下 10 次赌

向红的方面
下 100 次赌

概率

结果

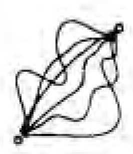
−100 −80 −60 −40 −20 0 +20 +40 +60 +80 +100



如果宇宙的边界只不过是时空的一点，我们便能够不断延展我们的前沿

上，我们可以超越过它并宣布更远的领地为宇宙的一部分。另一方面，如果宇宙的边界是处于一个不整齐的边缘，在那儿空间和时间被挤皱而且密度无限大，要去定义有意义的边界条件则非常困难。

然而，我和一位合作者，詹姆·哈特尔意识到还存在第三种可能性。宇宙在空间和时间中也许没有边界。初看起来，这似乎与彭罗斯和我证明的定理直接抵触。该定理指出，宇宙必须有过一个开端，即时间的边界。然而，正如在第二章中解释过的，存在另一种时间，称





1988年费因曼去世时在加州理工学院的黑板

理查德·费因曼

费因曼轶事

1918年,里查德·费因曼诞生于纽约的布鲁克林,1942年他在普林斯顿大学的约翰·惠勒指导下完成了博士学位。之后不久,他被卷入到曼哈顿规划中去。在洛萨拉莫斯实验室他喜欢解开最高机密保险柜的密码。他因活跃的性格和恶作剧而著称,而且作为一名罕见的物理学家,他成为原子弹理论的一名关键的贡献者。费因曼对世界的永恒的好奇心是他生命的本源。它不仅是他科学的成功的引擎,还使他立下大量令人惊异的功勋,例如,玛雅像形文字的破译。

二战之后,费因曼找到研究量子力学的新的有力的方法,因此他被授予1965年的诺贝尔奖金。他向基础的经典假设,即每个粒子只有一个特定的历史进行挑战。相反地,他建议一个从某位置到另一位置的粒子沿着通过时空的每一可能的路径运动。费因曼赋予每一轨道以两个数,一个是大小也就是波幅,另一个是相位,也就是它是否处于波峰或波谷。粒子从A到B的概率是把通过A和B的所有路径的有关的波求和得到。

尽管如此,在日常世界中,我们似乎觉得,物体在出发点和目的地之间只沿着一个单独的路径运动。因为对于大的物体,费因曼把数赋予每一路径的规则保证除了一个路径外所有路径的贡献在求和时都抵消了。所以日常经验和他的多重历史思想不矛盾。就宏观物体的运动而言,在无数的路径中只有一个是要紧的,这一轨道正是在牛顿经典运动定律中出现的那一个。

作虚时间,那是和我们感觉到正在流逝的通常的实时间成直角的时间。宇宙在实时间中的历史确定其在虚时间中的历史,反之亦然,但是这两种历史可以非常不同。特别是,宇宙在虚时间中可不必有开端或终结。虚时间正如同空间中的另一个方向那样行为。这样,宇宙在虚时间中的历史可被认为是一张曲面,像一个球面,一个平面或者一个马鞍面,只不过是四维而不是二维的(见84页,图3.9)。

如果宇宙的历史像一张马鞍面或一张平面那样伸展开去,人们就遭遇到如何在无穷处选取边界条件的问题。但是,如果宇宙在虚时间中的历史是一张闭合的



在费因曼的路径积分中粒子可取每一个可能的路径



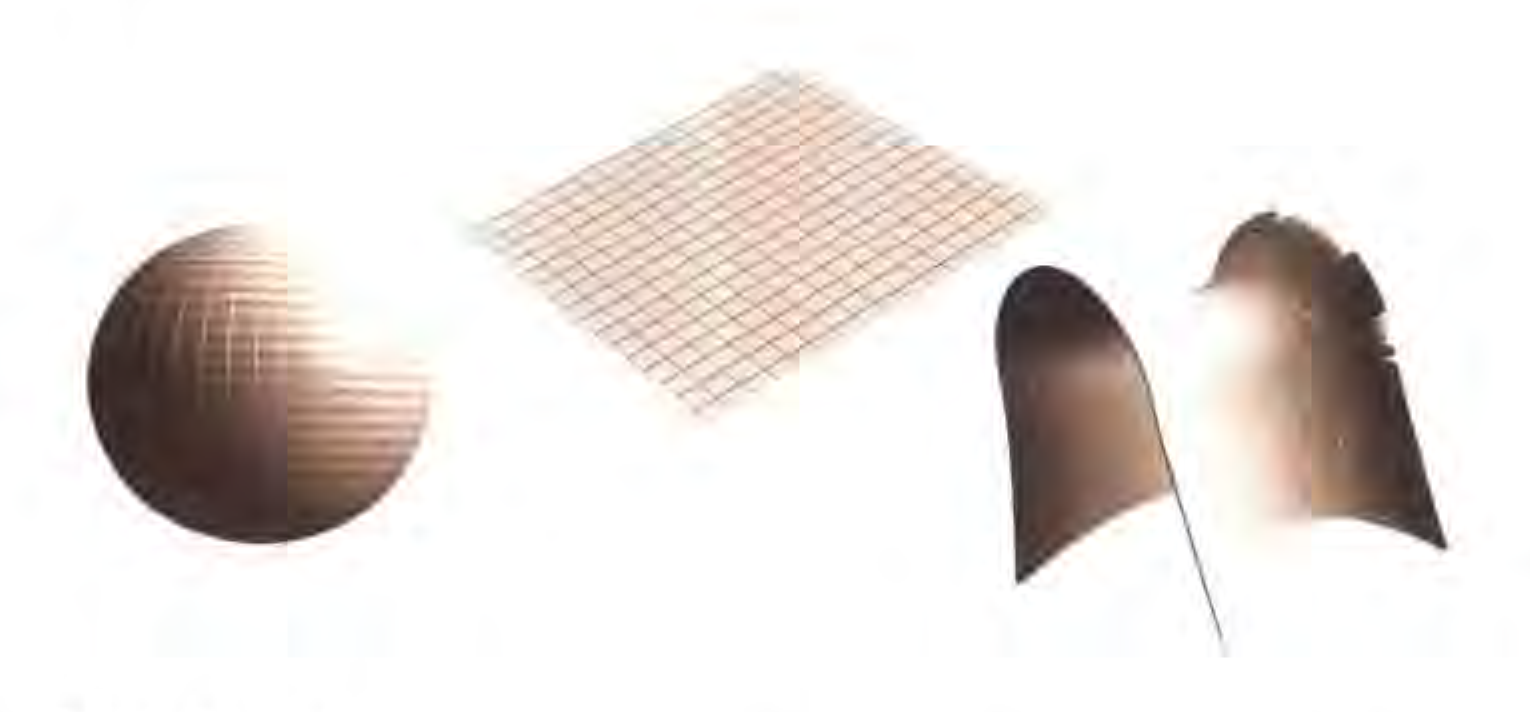


图 3.9　宇宙的历史

如果宇宙的历史像一张马鞍面那样向无穷远伸展，人们就遇到了在无穷远处如何指定边界条件的问题。如果宇宙在虚时间里的所有历史是像地球表面那样的闭合面，人们就根本不用指定边界条件。

演化定律和初始条件

物理学定律规定一个初始状态如何随时间演化。例如，如果我们向空中抛出一块石头，引力定律将准确地规定石头后续的运动。

但是，我们光从这些定律不能预言石头将落在何处。为此，我们还应该知道它离开我们手时的速度和方向。换言之，我们必须知道其初始条件，也就是石头运动的边界条件。

宇宙学企图利用这些物理定律来描述整个宇宙的演化。因此，我们必须诘问宇宙的初始条件应是什么？我们应该对这些初始条件应用这些定律。

初始状态可能对于宇宙的特征有过根本的影响，也许甚至影响到基本粒子和力的性质，而这些对于生命的发展是极其关键的。

一种设想是无边界条件，其设想是说时间和空间是有限的，形成了没有边界的闭合面，正如地球的表面那样，尺度上是有限的但是没有边界。无边界设想是以费因曼的多重历史的观念为基础，但是在费因曼求和中的粒子的历史现在被整个时空所取代，后者代表整个宇宙的历史。无边界条件正是把宇宙的可能历史限制在虚时间中没有边界的那些时空。换言之，宇宙的边界条件是它没有边界。

宇宙学家现在正在研究，无边界设想支持的初始形态也许还和弱人择原理一道，是否很可能演化成像我们观察到的那样的一个宇宙。



曲面，正如地球的表面那样，人们便可以在根本上避免边界条件的选取。地球的表面没有边界或边缘。从来未有可靠的报道说人们从那儿失足落下。

如果正如哈特尔和我设想的那样，宇宙在虚时间中的历史的确是一张闭合的曲面，它对于哲学和我们从何而来的图景便有基本的含义。宇宙就会是完全自足的；它不需要外界的任何东西去卷紧其发条并启动之。相反地，宇宙中的任何东西都由科学定律以及宇宙之中的骰子的滚动所确定。这听起来也许有些狂妄，但是它正是我和许多其他科学家所相信的。

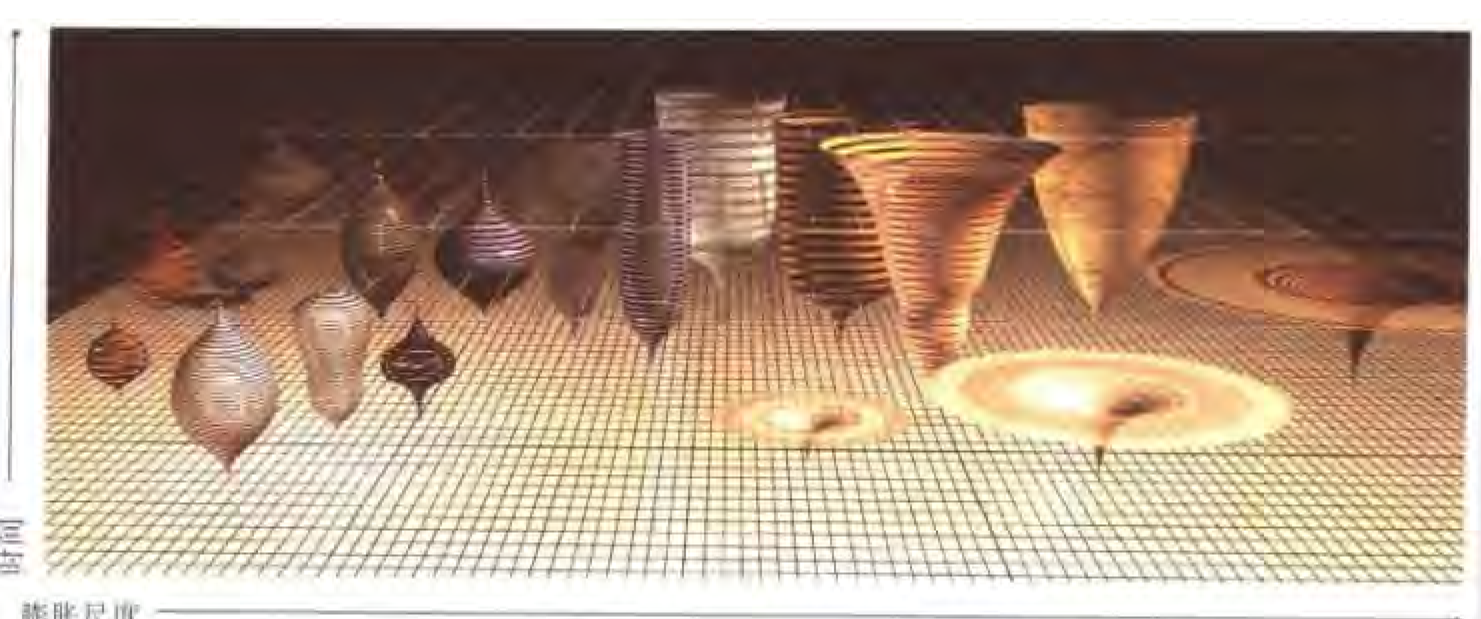
如果即便宇宙的边界条件是它没有边界，它也不仅仅只有一个单独的历史。它将具有多重历史，正如费因曼所建议的那样。对应于每一种可能的闭曲面在虚时间中都存在一个历史，而在虚时间中的每一个历史都确定其在实时间中的历史。这样，我们对于宇宙就有了过量的可能性。是什么东西从所有可能的宇宙中挑选出我们在其中生存的特殊的宇宙呢？我们会注意到的一点是许多可能的宇宙历史不会经过形成星系和恒星的过程序列，而这个序列对于我们自身的发展是至关重要的。而智慧生命在没有星系和恒星的条件下







地球的表面没有边界或者边缘。有关人们从它坠下的报道显然是夸大其辞。



人择原理

粗略地讲，人择原理是说，我们看到的宇宙是这种样子，至少在部分上是因为我们的存在。从整体外观上看，那刚好和完全可预见的统一理论的梦想正相反。在统一理论中自然定律是完备的，而世界之所以这样子，是因为它不可能是别的样子。人择原理具有多种不同版本，从弱到无聊的，到那些强到荒谬的程度。虽然大多数科学家对人择原理的强的版本持迟疑态度，很少人对某些弱人择的论证的效用有异议。

弱人择原理归结成解释宇宙的可能的各种时期或者部分中的那些我们可以栖居。例如，为何大爆炸发生于大约一百亿年以前的原因是，宇宙必须足够古老，使某些恒星已经完成它们的演化以产生像氧和碳那样的元素，我们就是由它们构成的，而宇宙也必须足够年轻，使得某些恒星仍然在提供能量以维持生命。

在无边界设想的框架内，人们可以利用费因曼的规则，把数赋予宇宙的每个历史，去发现宇宙的那个性质很可能发生。在这种情形下，因为要求历史包含有智慧生命，所以必须贯彻人择原理。当然，如果人们能证明宇宙的一些不同的初始形态很可能已演化产生像我们今天观察到的一个宇宙，人们将会对人择原理更加欢欣鼓舞。这就意味着我们栖居的宇宙部分的初始状态不必被很仔细地挑选过。



左图 3.10
插图最左面是那些向自身坍缩成为闭合的宇宙(a)。在最右面是那些将永远继续膨胀的开放的宇宙(b)。

那些在向自身落回和继续像(c1)或者像(c2)双暴胀那样膨胀之间平衡的临界宇宙可以怀有智慧生命。我们自己的宇宙(d)现在正准备着继续膨胀。







我们自己的宇宙现在继续膨胀

演化似乎是不太可能的。这样，我们作为能够诘问“宇宙为何是这样子？”的问题的生命的存在本身，便是加在我们生活其中的历史的一个限制。它意味着我们的历史是具有星系和恒星的少数历史中的一个。这就是所谓的人择原理的一个例子。人择原理讲，宇宙必须多多少少像我们看到的那样，否则的话，便不会有任何人在此观察它（图 3.10）。许多科学家不喜欢人择原理，因为它似乎相当模糊，而且似乎没有多少预言能力。但是可以赋予人择原理以精确的表述，而且当处理宇宙起源之时它看来是关键的。在第二章中描述的 M－理论允许巨大数量的可能的宇宙历史。这些历史中的大多数不适合智慧生命的发展；它们要么是空虚的，要么太短命，要么太过弯曲，或者在其他某方面出差错。而根据理查德·费因曼的多重历史观念，这些不可居住的历史可有相当高的概率(见 84 页)。



事实上，可以存在多少不包含智慧生命的历史根本没有什么关系。我们只对智慧生命在其中







发展的历史的子集感兴趣。这种智慧生命可以一点都不像人类。小绿色外星人也可以。事实上，他们也许更优秀。人类的智慧行为的记录并不非常光彩。

作为人择原理威力的一个例子，考虑空间中的方向的数目。我们生存在三维空间中，这是一个常识。那也就是说，我们可以用三个数来代表空间中的一点的位置，例如纬度、经度和海拔高度。但是为何空间是三维的呢？为什么不像科学幻想中的那样为二维的、或者四维的，或者甚至是其他维的呢？在 M－理论中，空间有九维或者十维，但是人们认为其中六个或七个方向被卷曲成非常小，只留下三个大的几乎平坦的方向（图 3.11）。



图 3.11
从远处看，饮料麦秸就像一根一维的线。

为何我们不生活在八维被卷曲得很小只留下二维可让我们觉察到的历史中呢？一只二维动物要消化食物非常困难。如果它有一根穿透自身的肠子，它就把动物分离成两部分，而这可怜的生灵就一分为二了。这样



图 3. 12A

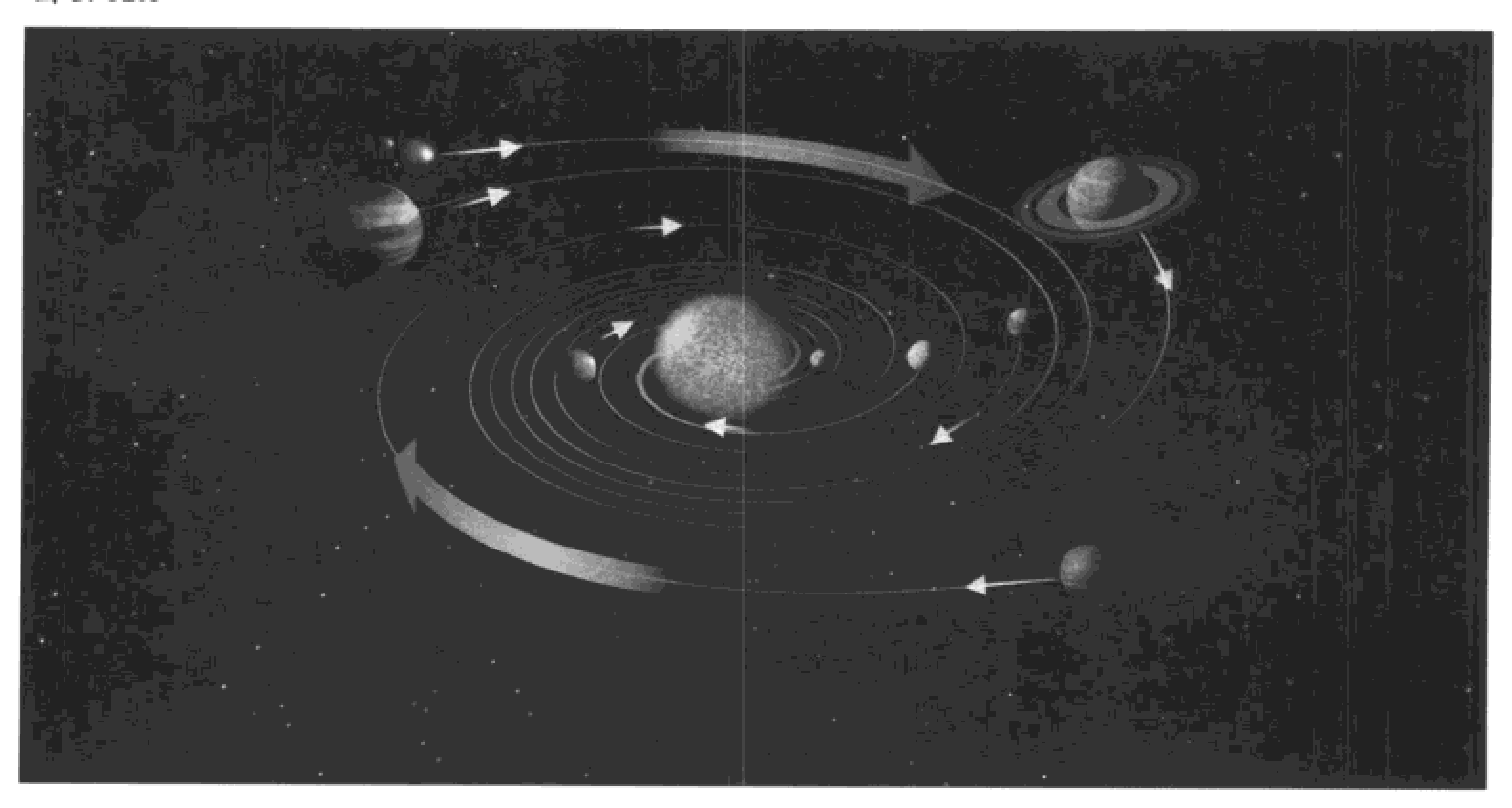


图 3. 12B

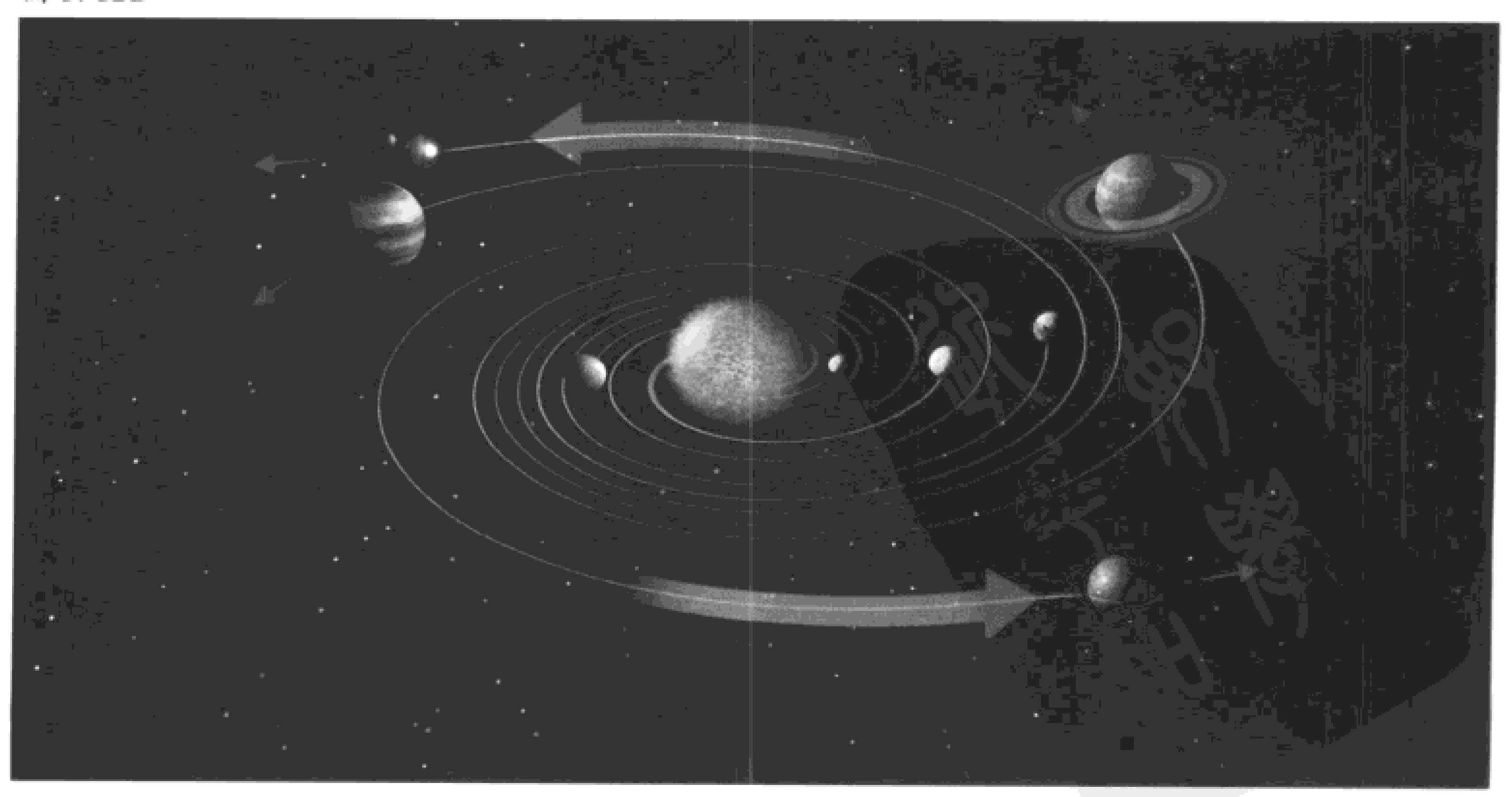






图 3.13

最简单的虚时间无边界历史是一个球面。

这确定在实时间中的历史：它以暴胀的形式膨胀。

两个平坦的方向对于任何像智慧生命这样复杂的东西是不够的。另一方面，如果存在四个或者更多个的几乎平坦的方向，那么两个物体之间的万有引力在它们互相靠近时就增加得更快。这就意味着行星们没有围绕其太阳公转的稳定轨道。它们要么会落到太阳中去(见89页，图3.12A)，要么逃逸到黑暗和寒冷的太空去(图3.12B)。

类似地，原子中的电子的轨道也不稳定，因此我们所知的物体便不存在。这样，尽管多重历史的思想允许任何数目的几乎平坦的方向，只有具有三个平坦方向的历史才包含智慧生命。也只有在这种历史中才会提出这样的诘问："为何空间具有三维？"

宇宙在虚时间中的最简单的历史是一个圆球面，正如地球的表面那样，只是多了两个维(图3.13)。它确





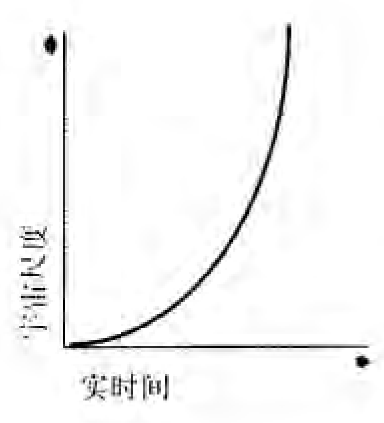
图 3.14　物质能量　引力能量

定ʃ宇宙在我们所经历的实时间中的历史、在这个历史中宇宙在空间的每一点 |:都相同，而在时间中膨胀。它在这些方面和我们生活其间的宇宙很相像。但是其膨胀率非常快速而且它不断地越变越快。这种加速膨胀被称为暴胀，因为它就象价格以一直上升的速率增长的方式。

一般而言，价格的暴胀被认为是糟糕的事，但是在宇宙的情形下，暴胀是非常有用的。其巨大的膨胀将早期宇宙中也许存在的坑坑洼洼全部抹平。随着宇宙膨胀，它从引力场借得能量去创造更多的物质。上的物质能量刚好和负的引力能量相互平衡，这样使总能量为零。当宇宙的尺度加倍，物质和引力能都加倍——这样，零的两倍仍为零。如果银行业这么简单该多好(图 3.14)!







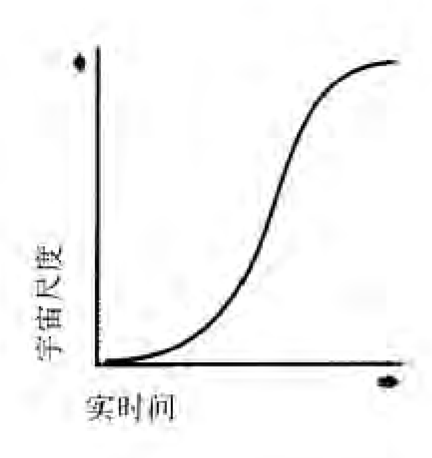


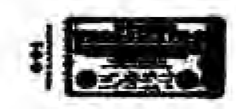
图 3.15

暴胀宇宙

在热大爆炸模型中，在早期宇宙中热量没有足够的时间从一个区域流到另一个区域去。尽管如此，无论我们观测任何方向，微波背景辐射的温度总是一样的。这意味着，宇宙的初始状态在任何地方都应具有完全相同的温度。

为了寻找一个模型，在该模型中许多不同的初始状态都已演化成某种像我们现代的宇宙，人们建议早期宇宙也许经历了一个非常快速膨胀的时期。这个膨胀被称作暴胀，这意味着它以不断增加的速率，而不像我们今天观察的那样以减小的速率膨胀。这种暴胀相，可为为何宇宙在每一个方向都显得相同提供了解释。因为在早期宇宙中光有足够的时间从一个区域传播到另一个区域。

宇宙永远继续以暴胀方式膨胀的在虚时间中的对应历史是一个完美的球面。但是在我们自己的宇宙中，在短于一秒钟之后暴胀膨胀就缓慢下来，而星系得以形成。这意味着我们宇宙在虚时间中的历史是一个在南极稍微平坦一些的球面。



批发价指数——通货膨胀和超级通货膨胀

日期	指数
1914 年 7 月	1.0
1919 年 1 月	2.6
1919 年 7 月	3.4
1920 年 1 月	12.6
1921 年 1 月	14.4
1921 年 7 月	14.3
1922 年 1 月	**36.7**
1922 年 7 月	**100.6**
1923 年 1 月	**2,785.0**
1923 年 7 月	**194,000.0**
1923 年 11 月	**726,000,000,000.0**

1914 年的 1 德国马克

1923 年的 1 万马克

1923 年的 200 万马克

1923 年的 1000 万马克

1923 年的 10 亿马克

如果宇宙在虚时间中的历史是完美的圆球面，那么在实时间中的相应的历史就会是继续以暴胀方式永远膨胀的宇宙。当宇宙在暴胀时，物质不会落到一起形成星系和恒星，而且生命，更不用说像我们这样的智慧生命能够发展。这样，尽管多重历史思想允许在虚时间中完美圆球面的宇宙历史，它们不是特别有趣。然而，在虚时间中球面南极处略微平坦些的历史和我们更加相关（图 3.15）。

在这种情形下，在实时间中的相应的历史首先以加速暴胀的方式膨胀。但是这种膨胀接着开始缓慢下来，而且星系能够形成。为了让智慧生命得以发展，南极处变平的程度必须是极其微小的。这将意味着宇宙

图 3.16　暴胀也许是自然定律

在德国通货膨胀在议和之后直到 1920 年 2 月一直上升。当时价格水平相当于 1918 年的 5 倍

在 1922 年 7 月之后超暴胀相开始。在 15 个月里人们对钱币的信心完全被摧毁。价格指数越来越快地上升，甚至超过了印刷纸币的速度，制造纸币赶不上贬值的速度。到了 1923 年后期，300 个纸厂开足马力而且 150 个印刷公司的 2000 个印刷厂日以继夜地制造通货。





a



b



c

图 3.17
很可能的和不太可能的历史

像(**a**)那样的光滑历史是最可能的，但是它们只有很少数。
尽管稍微不规则的历史(**b**)和(**c**)每一种都是更少可能，但是它们这么大量地存在，使得宇宙的历史很可能稍微有些不光滑。

将首先膨胀一个巨大的倍数。两次世界大战之间德国的通货膨胀创造了记录，价格上升了几十亿倍，但是在宇宙中发生的暴胀至少有一千亿亿亿倍(图 3.16)。

由于不确定性原理，包含智慧生命的宇宙不仅只有一个历史。相反地，在虚时间中的历史将为一整族稍微变形的球面。每一个对应于在实时间中宇宙长时期但非无限久暴胀的历史。然后我们可以问这些允许的历史中的哪一个是最可能的。终于发现最可能的历史不是完全光滑的，而是具有微小的起伏的(图 3.17)。在最可能历史中的涟漪实在是非常微小的。它和光滑的偏离只有十万分之一的数量级。尽管它们极其微小，我们已经设法观察到它们。这正是从太空不同方向到达我们这儿的微波的细小变化。宇宙背景探险者在 1989 年发射并且画出了天空的微波图。



COBE 卫星 DMR 仪器绘制的全天空图，它显示时间皱纹的证据。

不同颜色表示不同温度。但是从红到蓝的整体范围仅仅大约为一度的万分之一。然而，这种早期宇宙中不同区域之间的变化已足以在更密集的区域产生额外的引力吸引，去阻止它们永久膨胀下去，而使它们在自身的引力下重新坍缩，从而形成星系和恒星。这样，至少在原则上，COBE 图是宇宙中的所有结构的蓝图。

和智慧生命的出现相容的宇宙的最可能历史在未来将如何行为呢？依宇宙中的物质的量而定，似乎存在不同的可能性。如果物质密度超过某一临界值，则星系之间的引力吸引就会使它们之间的分离减缓下来，而且最终阻止它们相互飞离。然后它们将开始相互下落，并在一次大挤压中都撞到一起。大挤压是在实时间中宇宙历史的终结(见 96 页、图 3.18)。

如果宇宙密度低于临界值，则引力太弱，不足以阻

上图 3. 18
宇宙可能的一种终结是大挤压，所有物质将被吸回到它的巨大的灾难性的引力陷阱中去。

右图 3. 19
久远的寒冷的沉寂，万物耗尽它们的燃料，最后的恒星熄灭。

止星系永远相互飞离。所有恒星都燃烧殆尽，而宇宙将变得越来越空虚，越来越寒冷。这样，事情又要完结，但是以一种不那么戏剧性的方式。不管是哪种方式，宇宙将要继续再生存好几十亿年(图 3. 19)。

宇宙中除了物质，还可以包含所谓“真空能量”的东西。这种能量甚至存在于表观空虚的空间之中。按照爱因斯坦著名的方程，这种真空能量具有质量。这意味着它对宇宙膨胀具有引力效应。但是，非常引人注意的是，真空能量的效应和物质效应相反。物质使膨胀缓慢下来，并最终能使之停止而且反转。另一方面，真空能量使膨胀加速，正如暴胀那样。事实上，真空能量恰恰如在第一章中提到的宇宙常数那样行为。那是爱因斯坦在 1917 年意识到，他的原先的方程不能允许一个代



表静态宇宙的解时，加到方程上去的。在哈勃发现了宇宙膨胀之后，将这一项加到方程上的动机即不复存在，而爱因斯坦将宇宙常数当做一项错误而拒绝。

然而，这也许根本就不是错误：正如在第二章中描述的，我们现在意识到，量子理论意味着时空充满了量子涨落。在一种超对称的理论中，这些基态起伏的无限大的正的和负的能量，在不同自旋的粒子之间刚好对消。但是，因为宇宙不处于一种超对称态，所以我们不会指望正的和负的能量被完全对消，甚至连小的有限的真空能量都不遗留下来。仅有的令人惊讶的是，真空能量这么接近于零，这一点在不久前还没有这么显明。这也许是人择原理的另一个例子。具有更大的真空能量的历史不会形成星系，也就不包含能够询问这个

宇宙常数

是我的

最大的

错误吗？

阿尔伯特·爱因斯坦

图 3.20
结合远处超新星，宇宙微波背景辐射和宇宙中物质分布的观察可以相当好地估算宇宙中的真空能量和物质密度。

问题的生物："为何真空能量这么低？"

我们从各种观测可以试图确定宇宙中物质和真空能的量。我们可以用一张图来标明此结果，水平方向表示物质密度而垂直方向表示真空能量。点线显示智慧生命能够发展的区域边缘（图 3.20）。

在这张图上分别标出对应于超新星、物质成都团和微波背景的观测的区域。幸运的是，这三个区域有一个共同的交集。如果物质密度和真空能量处于这个交



"即便把我关在果壳之中,
仍然自以为无限空间之王。"

——莎士比亚,
哈姆雷特, 第二幕, 第二场



集，它意味着宇宙膨胀在长期变缓慢之后已开始重新加速。看来暴胀可能是自然的一个定律。

我们在这一章中已经看到，如何按照浩渺宇宙在虚时间中的历史来理解它的行为。这个在虚时间中的历史是细小的略微平坦的球面。它酷似哈姆雷特的果壳，然而这个果壳把在实时间中发生的一切都作为密码贮存在它上面。这样，哈姆雷特是完全正确的。我们也许是被束缚在果壳之中，而仍然自以为无限空间之王。

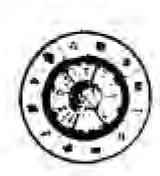


第四章

预言未来

黑洞中的信息丧失如何降低我们预言未来的能力。





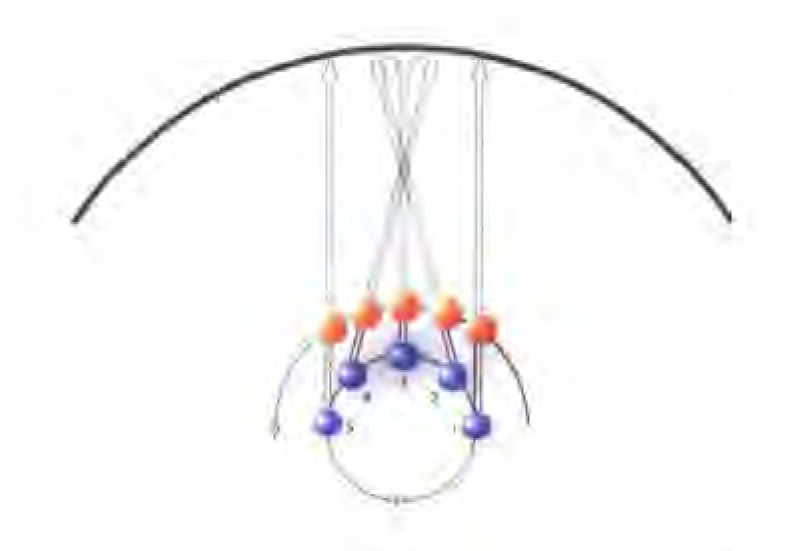


图 4.1
一位在围绕着太阳公转的地球(蓝色)上的观察者在星座背景下观看火星(红色)。
行星在天空中的复杂表观运动可由牛顿定律解释，而毫不影响个人的命运。

人类总想控制未来，或者至少要预言将来发生什么。这就是为何占星术如此流行的原因。占星术宣称地球上的事件和行星划过天穹的运动相关联。如果占星家们胆敢冒险并作出可被检验的确定的预言的话，这便是或者将会是科学上可以检验的假设。然而，他们识相得很，所做的预告都是这么模糊，使得对任何结果都能左右逢源。诸如"个人关系可能紧张"或者"你将有一个高报酬的机会"等等断言永远不会被证伪。

但是科学家不信占星术的真正原因不是因为科学证据或者毋宁说缺乏科学证据，而是它和已被实验检验的其他理论不协调。在哥白尼和伽利略发现行星围绕太阳而非地球公转，而且牛顿发现制约它们运动的定律后，占星术变成极其难以置信。为什么从地球上看到其他行星相对于天空背景的位置和较小行星上的自称为智慧生命的巨分子有任何关联呢(图 4.1)?而这正是占星学要让我们相信的。在本书描述的某些理论并不比占星术拥有更多的实验证据，但是因为这些理论和迄今经受住检验的理论相协调，所以我们相信它们。

牛顿定律和其他物理理论的成功导致科学宿命论的观念。它是在 19 世纪初由法国科学家拉普拉斯侯爵



"火星于本月进入人马座。对于你而言是寻求自身知识的时候。火星要求你以自以为正确的而非他人以为正确的方式生活。而这将会发生。
土星于 20 日到达你的太阳图中与义务和事业相关的区域，而你将会学习负责任和处理困难的关系。
然而，你在满月之时将会对改变你的整个生活有一个美妙的洞察和概观。"



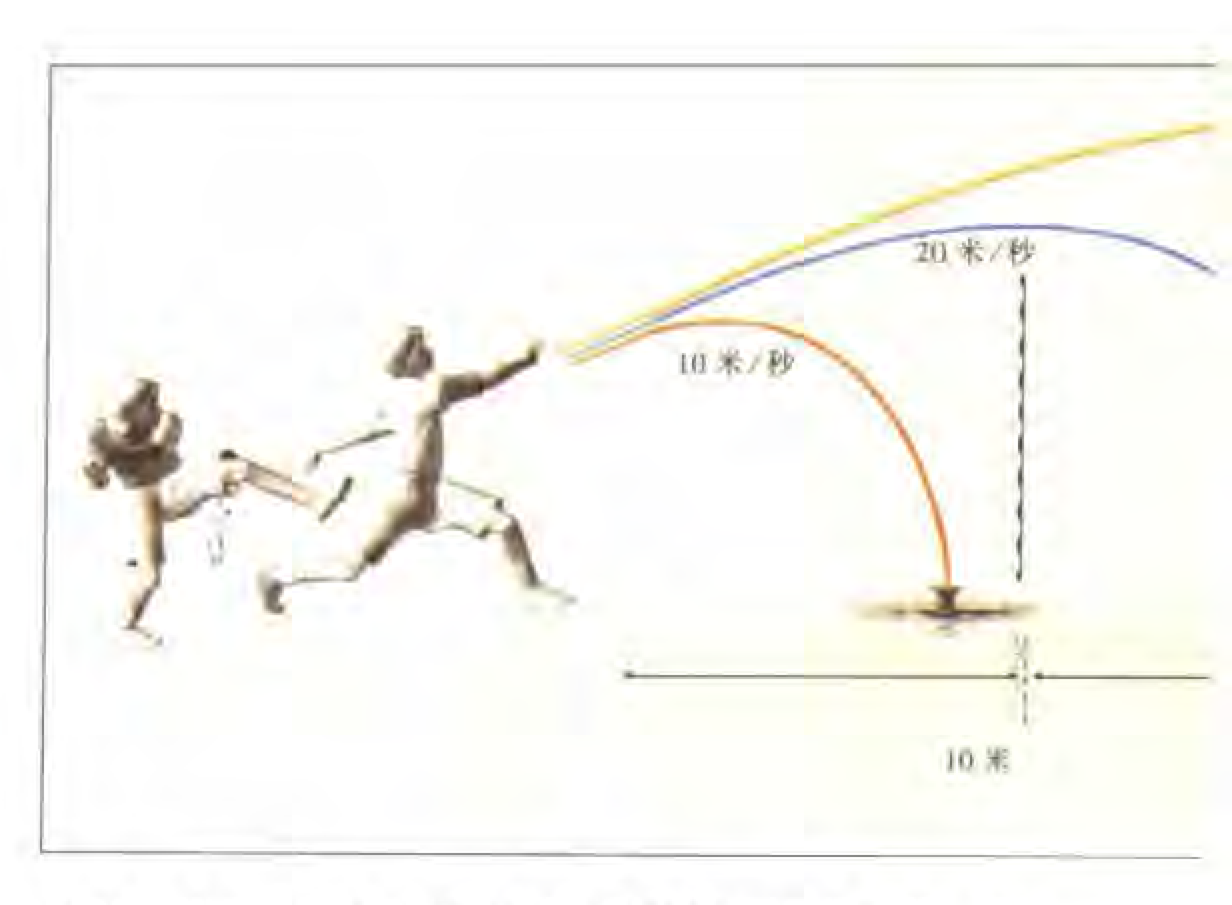


图 4.2
如果你知道棒球在何处以什么速度抛出，你便能预言它会落到何处。

首次表述的。拉普拉斯建议，如果我们知道在某一时刻宇宙中所有粒子的位置和速度，则物理定律应允许我们预言宇宙在过去或将来的任何时刻的状态（图 4.2）。

换言之，如果科学宿命论成立，我们在原则上便能够预言将来，而不必借助于占星术。当然在实际上甚至简单得像牛顿引力论那样的东西也会导出对于多于二个粒子的情形都不能得到准确解的方程。况且，方程经常具有所谓混沌的性质，这样在某一时刻位置或速度的微小变化会导致在将来完全不同的行为。《侏罗纪公园》的观众都知道，在一处很小的扰动会在另一处引起巨变。一只蝴蝶在东京鼓翼会在纽约中央公园引起大雨（图 4.3）。麻烦在于，事件的序列是不可重复的。蝴蝶下一回鼓翼时，一大堆其他因素将会不同并且也影响天气。这就是天气预告这么不可靠的原因。

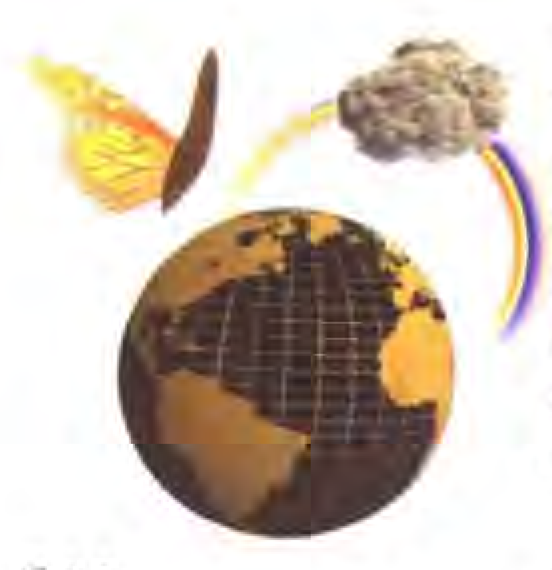
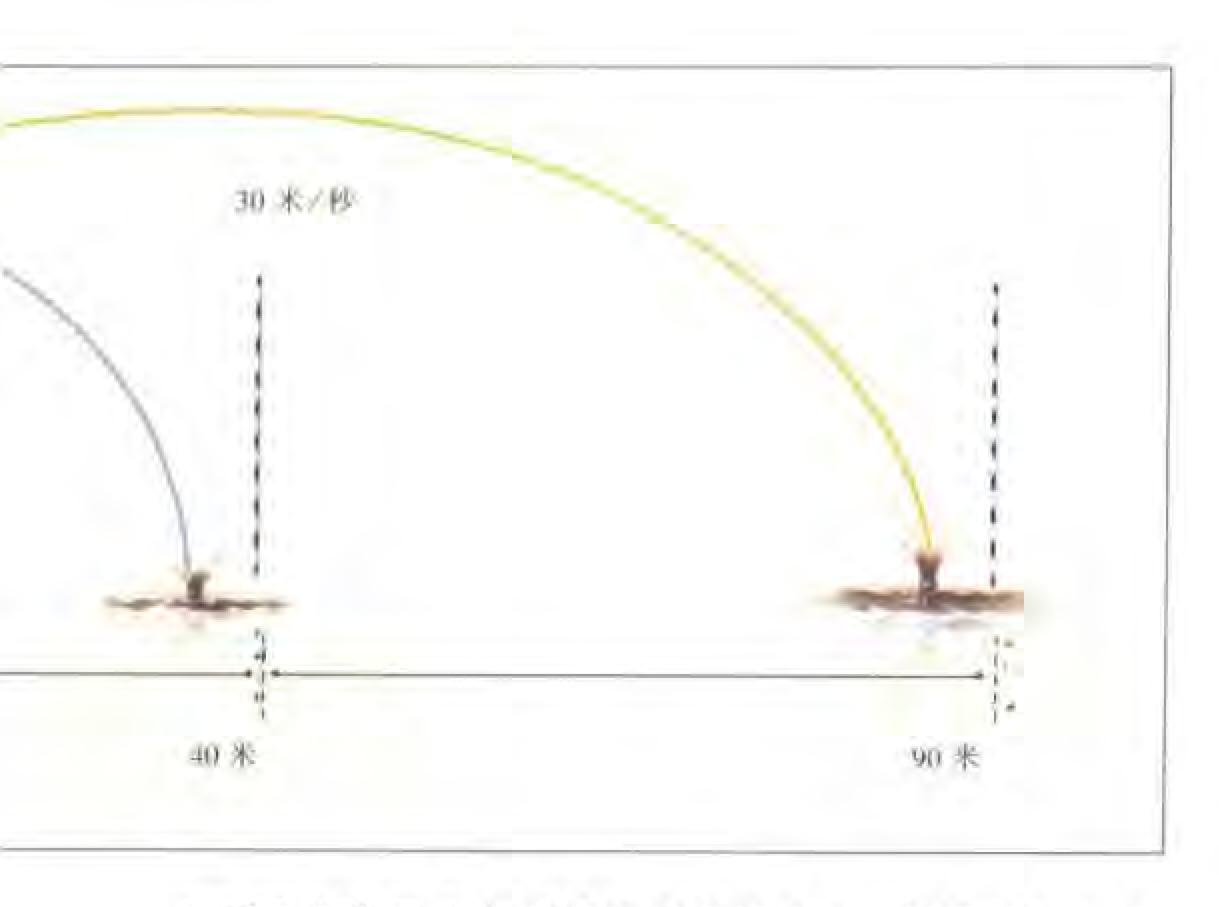


图 4.3

这样，虽然在原则上，量子电动力学定律应该允许我们去计算化学和生物学中的一切，我们在从数学方





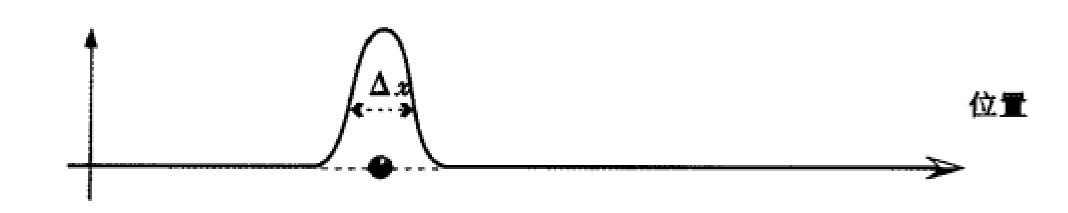
程预言人类行为方面并没有长足进步。尽管这些现实的困难，大多数科学家仍然自我安慰，认为在原则上，将来是可以预言的。

初看起来，宿命论似乎还受到了不确定性原理的威胁。不确定性原理讲，我们不能在同一时刻准确地测量一个粒子的位置和速度。我们把位置测量得越准确，就把速度确定得越不准确，反之亦然。而拉普拉斯的科学宿命论坚持，如果我们知道在某一瞬间的粒子位置和速度，就能确定其在过去或者将来任何时刻的位置和速度。但是，如果不确定性原理阻止我们同时准确知悉一个时刻的位置和速度，我们甚至无从开始。无论我们有多么好的计算机，如果我们输入糟糕的数据，我们将得到糟糕的预言。

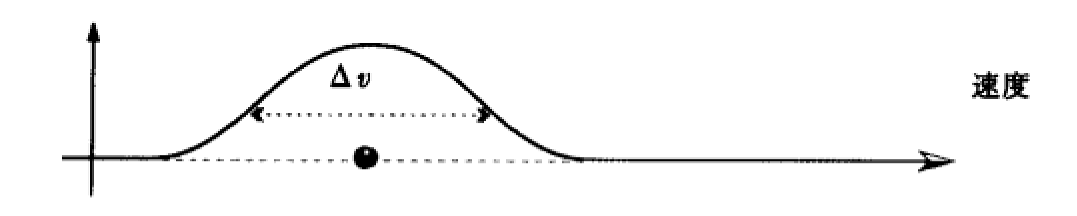


然而，在一种合并了不确定性原理的称作量子力学的新理论中，宿命论以一种修正的方式得到恢复。粗略地讲，人们在量子力学中可以精确地预言在经典的

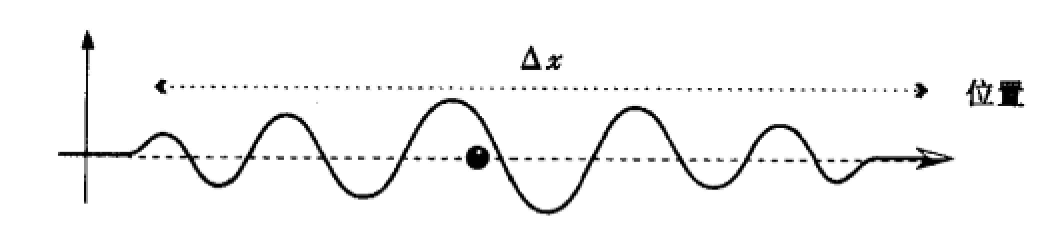
尖峰突起的波函数 Ψ



粒子速度的概率分布



波列波函数 Ψ



粒子速度的概率分布

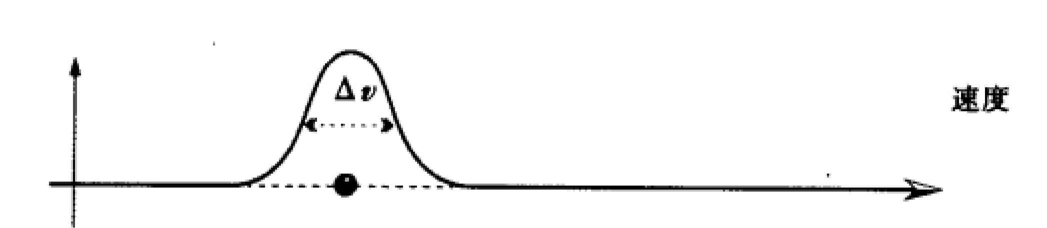


图 4.4
波函数确定粒子具有不同位置和速度的概率，而 Δx 和 Δv 服从不确定性原理。

拉普拉斯观点中所期望的一半。一个粒子在量子力学中不具有很好定义的位置或速度，但是它的状态可由所谓的波函数代表(图 4.4)。

波函数是在空间的每一点上的一个数，它给出在那个位置上找到该粒子的概率。波函数从一点到另一点的变化率告诉我们粒子不同速度的概率。有些波函数在空间的特定点有尖锐的高峰。在这些情形下，粒子在位置上只有小量的不确定性。但是我们在图上还能看到，在这种情形下，波函数在这点邻近变化得很快速，一边上升一边下降。这意味着速度的概率在很大的范围散开，换句话说，就是速度的不确定性很大。另一方面，考虑一列连续的波。现在在位置上存在大的不确定性，但是在速度上存在小的不确定性。这样，由波函

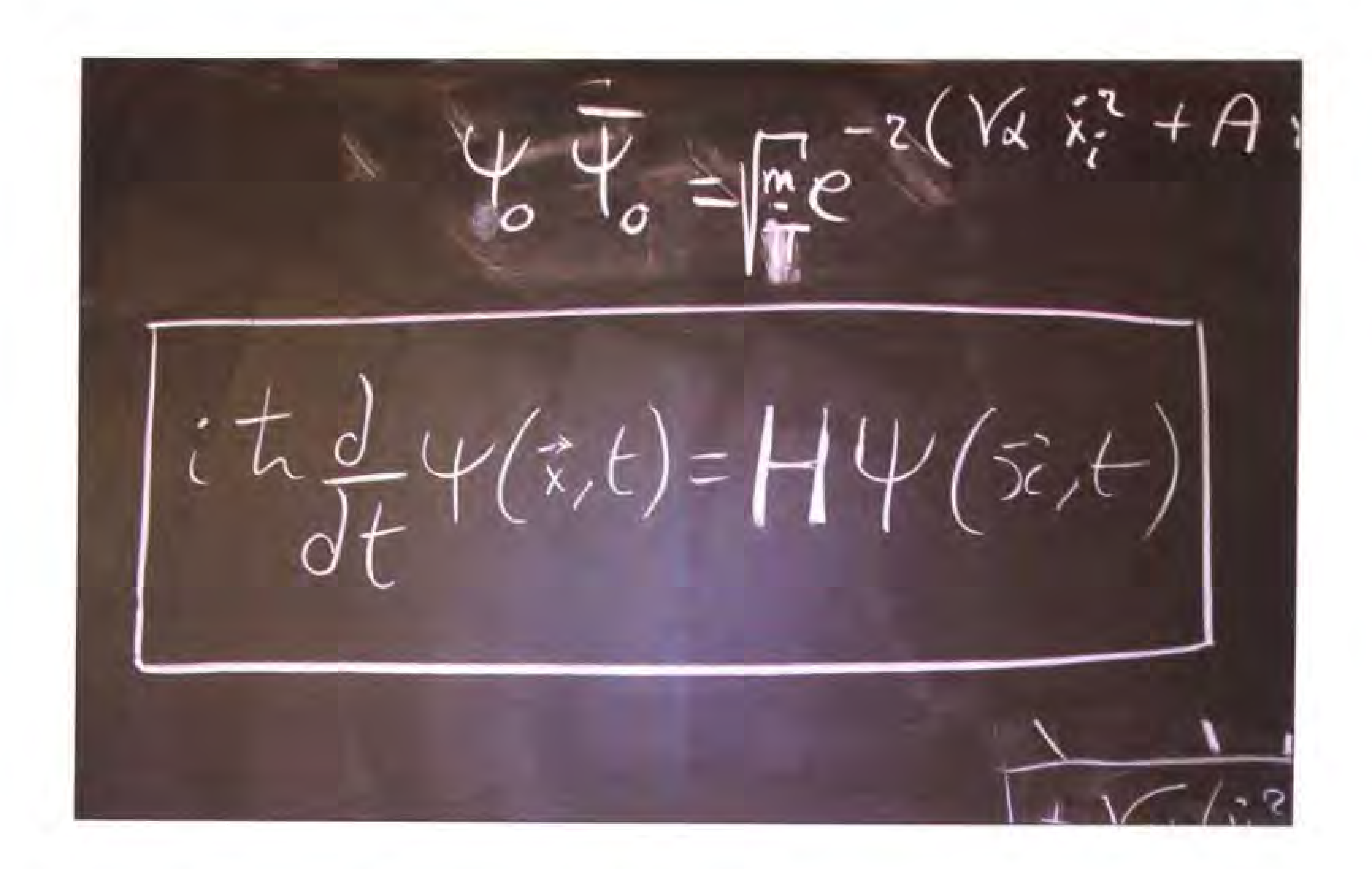


图 4.5
薛定谔方程

波函数 Ψ 在时间中的演化由哈密顿算符 H 确定，后者和被考虑的物理系统的能量相关。

数描述的粒子不具有很好定义的位置或速度。它满足不确定性原理。现在我们意识到波函数就是我们能够很好定义的一切。我们甚至不能设想粒子具有上帝知晓的位置和速度，而我们是被蒙蔽了。这种“隐变量”理论预言的结果和观察不相符。甚至上帝也受不确定性原理的限制，而不能知悉位置和速度；祂只能知道波函数。

波函数随时间的变化率由所谓的薛定谔方程给出（图 4.5）。如果我们知道某一时刻的波函数，我们就能利用薛定谔方程去计算在过去或将来任一时刻的波函数。因此，在量子理论中仍然存在宿命论，但它是处于一种减缩的形式。取代同时预言位置和速度的能力，我们只能预言波函数。这就允许我们准确地预言位置，或者预言速度，但是二者不能得兼。这样，在量子理论中





图 4.6
在狭义相对论的平坦时空中以不同的速度运动的观察者具有不同的时间测量，但是我们可以在其中的任何一个时间中应用薛定谔方程去预言将来的波函数是什么样的。

进行准确预言的能力只是在经典的拉普拉斯世界观中的一半。尽管如此，在这种限制的意义上讲，人们仍然可以宣称存在宿命论。

然而，利用薛定谔方程在时间前进的方向去演化波函数（也就是去预言未来会发生什么）隐含地假定时间在所有地方永远光滑地流逝。在牛顿物理学中这肯定是正确的。时间被假定为绝对的，这意味着在宇宙的历史中的每一事件都被一个称作时间的数标志着，而且时间标志的系列从无限的过去圆滑地连续到无限的将来。这也许可被称作常识时间观，而且这还是大部分人甚至大部分物理学家下意识的时间观。然而，正如我们看到的，绝对时间的概念在 1905 年被狭义相对论所抛弃。在狭义相对论中时间不再是自身独立的量，而只不过是称作时空的四维连续统中的一个方向。在狭义相对论中，不同的观察者以不同的速度在不同的途径穿越时空。每一位观察者沿着他或她遵循的途径具有自己的时间测度，并且不同的观察者在事件之间测量到的时间间隔是不同的（图 4.6）。





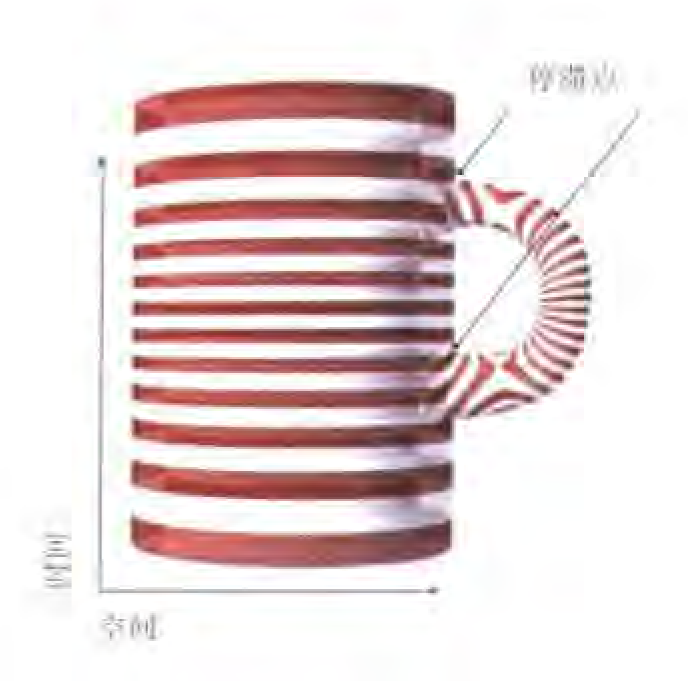


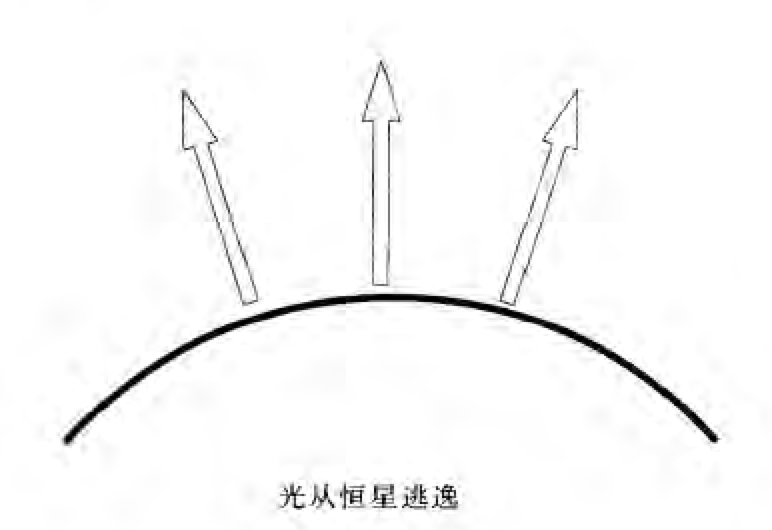
图 4.7　时间停止不前

时间测量在手把接到主圆柱之处必须有停滞点：也就是时间停止不前之处。时间在这些点上向任何方向都不增加。因此，人们不能应用薛定谔方程去预言将来的波函数是什么样的。

这样，在狭义相对论中不存在我们可用以给事件加标签的惟一绝对的时间。然而，狭义相对论的时空是平坦的。这意味着在狭义相对论中，由任何自由运动观察者测量的时间在时空中从负无穷至正无穷光滑地流逝。我们可以使用其中的任一时间测度于薛定谔方程中去演化波函数。因此，在狭义相对论中我们仍然拥有宿命论的量子版本。

在广义相对论中情形便不同了。这里时空不是平坦的，而是弯曲的，并且它被其中的物质和能量所变形。时空的曲率在我们的太阳系中是如此之微小，至少在宏观的尺度上，它和我们通常的时间观念不冲突。在这种情形下，我们在薛定谔方程中仍然可用这种时间去得到波函数的决定性的演化。然而，我们一旦允许时空弯曲，则另外的可能性就会出现，即时空具有一种不允许对于每一观察者都光滑增长的时间结构，这一点正是我们对于合理的时间测量所期望的性质。例如，假设时空像一个垂直的圆柱面(图 4.7)。

圆柱面的垂直往上方向是时间测度，对于每位观



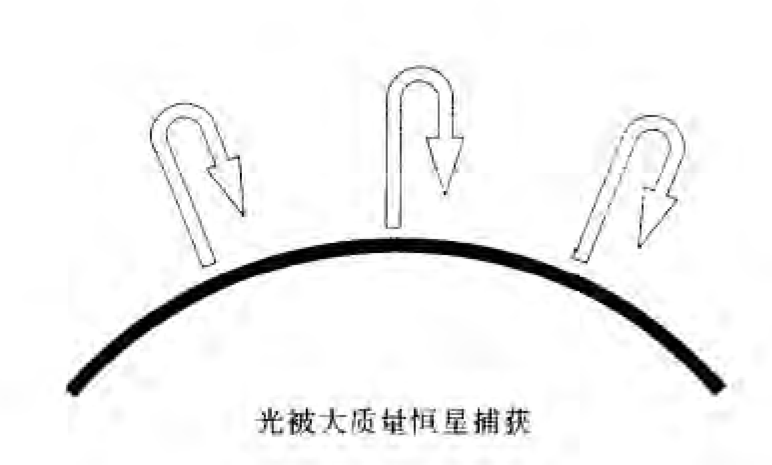


图 4.9


图 4.8

察者它从负无穷流逝到正无穷。然而，取而代之我们将时空想象成一个带把手（或"虫洞"）的圆柱面，这个把手从主圆柱面分叉开来又合并回去。那么任何时间测量都在把手和主圆柱面接合处有一停滞点：这就是时间静止之点。对于任何观察者而言，时间在这些点不流逝。在这样的时空中，我们不能用薛定谔方程去得到波函数的决定性的演化。谨防虫洞：你永远不知道从它们那儿会冒出什么来。

黑洞是我们认为时间对任何观察者并非总是增加的原因。1783 年人们首次讨论黑洞。一位剑桥的学监，约翰·米歇尔进行了如下的论证。如果有人垂直向上射出一个粒子，譬如炮弹，它的上升将被引力所减缓，而且这个粒子最终将停止上升并返回落下（图 4.8）。然而，如果初始往上的速度超过称作逃逸速度的临界值，引力将永远不够强大到足以停止该粒子，而它将飞离远去。对于地球而言逃逸速度大约为每秒 12 公里，对于太阳则大约为每秒 100 公里。这两个速度都比真正的炮弹速度高出许多，但是它们和光速相比就显得很可怜，后者是





施瓦兹席尔德黑洞

1916年德国天文学家卡尔·施瓦兹席尔德找到爱因斯坦相对论的一个解，它代表一个球形黑洞。施瓦兹席尔德揭示了广义相对论的一个令人吃惊的含义。他指出，如果恒星质量被集中在足够小的区域，恒星表面的引力场就会变得这么强，甚至光都不能逃逸。这就是现在我们称为黑洞的东西，它是时空中以所谓的事件视界为界的区域。任何东西，甚至光都不可能从黑洞到达远处的观察者。

在很长的时间里，大多数物理学家，包括爱因斯坦都很怀疑，物体的这么极端的形态在实际的宇宙中是否真正发生过。然而，现在我们理解，任何足够重的非旋转的恒星，不管它的形状和内部结构多么复杂，当它耗尽了核燃料，将必然坍缩成完美的球形的施瓦兹席尔德黑洞。黑洞的事件视界的半径(R)只依赖于它的质量；它由下式给出

$$R = \frac{2GM}{c^2}$$

在这个公式中(c)是光速，(G)是牛顿常数，而(M)是黑洞质量。例如，和太阳等质量的黑洞，其半径只有两英里。

每秒300 000公里。这样，光可以从地球或者太阳轻而易举地逃逸。然而，米歇尔论断，可以存在比太阳更大质量的恒星，其逃逸速度超过光速(图4.9)。因为任何发出的光都被这些恒星的引力拖曳回去，所以我们就不能看到它们。这样，它们就是米歇尔叫做暗星而我们现在叫做黑洞的东西。

米歇尔暗星的思想是基于牛顿物理学。牛顿理论中的时间是绝对的，不管发生任何事件它都正常流逝。这样，在经典的牛顿图像中它们不影响我们预言将来的能力。但是，在广义相对论中情形就非常不同，大质量物体使时空弯曲。

1916年，即广义相对论被提出之后不久，卡尔·施瓦兹席尔德（他在第一次世界大战时得病不久死于俄国前线）找到广义相对论中场方程的代表一个黑洞的解。在很多年里施瓦兹席尔德找到的东西没有得到理解或者重视。爱因斯坦本人从不相信黑洞，而且大多数广义相对论的元老认同他的态度。我还记得有一次





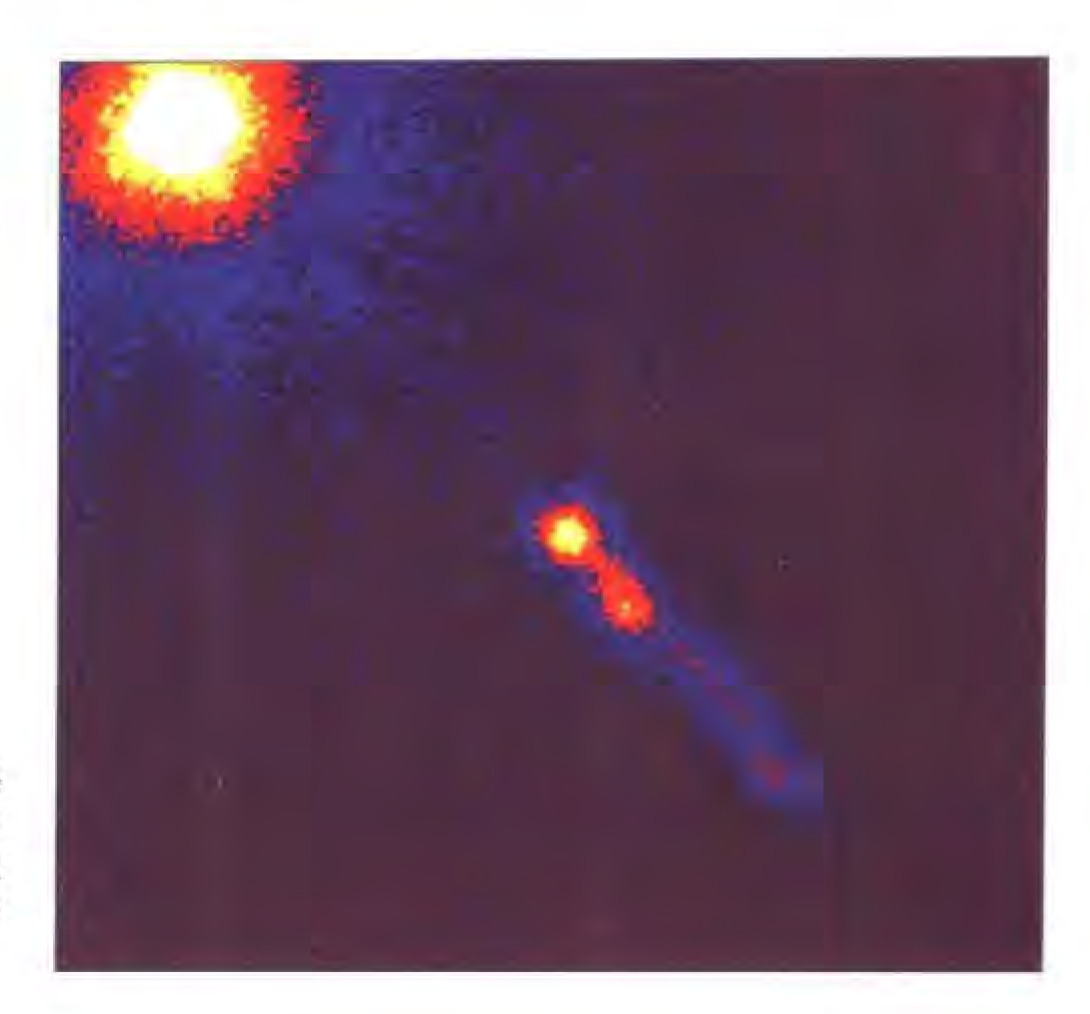


图 4.10
类星体 3C273，第一个被发现的类恒星无线电源，在一个小区域内产生了大量的功率。物质落入黑洞似乎是能够解释这么高亮度的惟一的机制。

约翰·惠勒

约翰·阿契巴尔德·惠勒于 1911 年出生于佛罗里达的杰克逊维尔。1933 年他得到约翰·霍普金斯大学博士，他的论文是关于氦原子对光的散射。1938 年他和丹麦物理学家尼尔斯·玻尔合作发展核裂变理论。之后，惠勒和他的研究生里查德·费因曼有一阵专心研究电动力学；但是在美国参与第二次世界大战之后不久，他们一道为曼哈顿规划效力。

惠勒在 1950 年代早期，由于受罗伯特·奥本海默在 1939 年的大质量恒星引力坍缩工作的启发，把注意力转向爱因斯坦的广义相对论。那时候大多数物理学家都忙于研究核物理，而广义相对论被认为与物理世界不相干。但是，惠勒既通过他的研究，又通过他在普林斯顿首次开相对论课程，几乎一手改变了这个领域。

多年之后，他于 1969 年为物体的坍缩状态杜撰了黑洞这个术语，那时很少人相信它是实际的。他受威纳·伊斯雷尔工作的启发，猜想黑洞没有毛，这意味着任何非旋转的大质量恒星的坍缩状态事实上应由施瓦兹席尔德解来描述。



去巴黎作学术报告，那是关于我发现的量子理论意味着黑洞不是完全黑的。我的学术报告彻底失败，因为那时候在巴黎几乎无人相信黑洞。法国人还觉得这个名字，如他们所翻译的，trou noir 具有可疑的性暗示，应该代之以 astre occlu 或"隐星"。然而，无论是这个还是其他提议的名字都无法像黑洞这个术语那样能抓住公众的想象力。这是美国物理学家约翰·阿契巴尔德·惠勒首先引进的，他激发了这个领域中的大量的现代研究。

1963 年类星体的发现引起有关黑洞的理论研究以及检测它们的观察尝试的迸发(图 4.10)。这里就是已经呈现的图景。考虑我们所相信的具有 20 倍太阳质量的恒星的历史。这类恒星是由诸如猎户座星云中的那些气体云形成的(图 4.11)。当气体云在自身的引力下收缩时，气体被加热上去，并且最终热到足以开始热聚变反应，把氢转化成氦。这个步骤产生的热量制造了压力，使恒星对抗住自身的引力，并且阻止它进一步收缩。一个恒星可以在这种状态停留很长时期，燃烧氢并将光辐射到太空中去。



图 4.11
恒星在像猎户星云那样的气体和尘埃云中形成

恒星引力场影响从它出发的光线的途径。人们可以画一张图，往上方向表示时间，水平方向代表离开恒星中心的距离(见 114 页，图 4.12)。在这张图上，恒星的表面由两根垂直线代表，在中心的两边各有一根。时间的单位可选为秒，而距离单位选择光秒——也就光在一秒钟内旅行的距离。当我们使用这些单位时，光速为 1，也就是光速为每秒一光秒。这意味着远离恒星及其引力场，图上的光线的轨迹是一根和垂直方向成 45°角的直线。然而，邻近恒星处，由恒星质量产生的时空曲率改变了光线的轨迹，使它们和垂直方向夹更小的角。

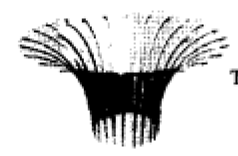
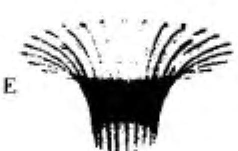


图 4.12
非坍缩恒星周围的时空。光线可以从恒星表面（垂直的红线）逃逸。光线在远离恒星时和垂直方向成45°角，但是在恒星附近，由于恒星质量引起的时空翘曲使光线和垂直方向成更小的角度。

图 4.13
如果恒星坍缩（红线在一点相遇）时空被翘曲得这么厉害，使邻近表面的光线向内运动。一个黑洞形成，这是从那里光都不能逃逸的时空的一个区域。

大质量恒星将比太阳更快速得多地把它们的氢燃烧成氦。这意味着它们可以在短到几亿年的时间内把氢耗尽。此后，这类恒星面临着危机。它们能把氦燃烧成诸如碳和氧等等更重的元素，但是这些核反应不会释放出大量能量，这样恒星失去支持自身对抗引力的热量和热压力。因此它们开始变得更小。如果它们质量比大约太阳质量的两倍还大，其压力将永远不足以停住收缩。它们将坍缩成零尺度和无限密度，从而形成所谓的奇点（图 4.13）。在这张时间对离开中心距离的图上，随着恒星缩小，从它表面出发的光线轨迹会在起始



时和垂直线夹越来越小的角度。当恒星达到一定的临界半径，其轨迹就变成图上的垂线，这意味着光线将在离恒星常距离处逗留，永远不能离开。光线的临界轨迹掠过的表面称作事件视界，它把时空中的光线能够逃逸的区域和不能逃逸的区域隔开来。在恒星通过其事件视界后，从它表面发射的光线将被时空曲率向里面弯折。恒星就成为一个米歇尔的暗星，或者用我们现在的话讲，就是黑洞。

如果光线不能从黑洞跑出，你何以检测它呢？其答案是黑洞正如坍缩之前的物体那样，仍然把同样的引

上图：视界，也就是黑洞的外边界是由不能从黑洞逃逸，而只能停止在离中心常数距离处徘徊的光线组成。



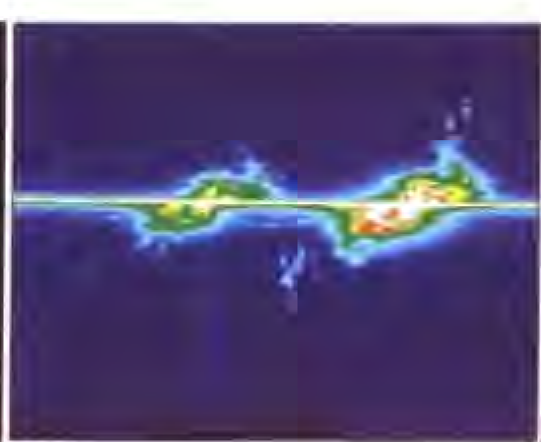




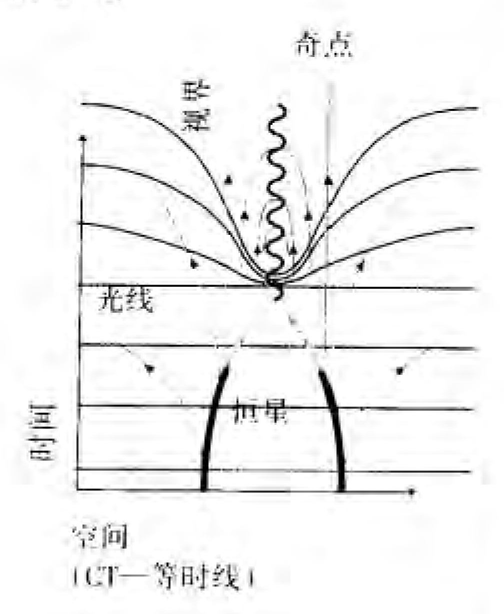
图 4.14
一个星系中心的黑洞

左上图：广场行星照相机拍摄的星系 NGC4151

中心图：穿过图像的水平线是由在 4151 中心的黑洞产生的光引起的

右上图：显示氧发射的速度的像
所有证据表明 NGC4151 包含有一个大约一亿倍太阳质量的黑洞

图 4.15

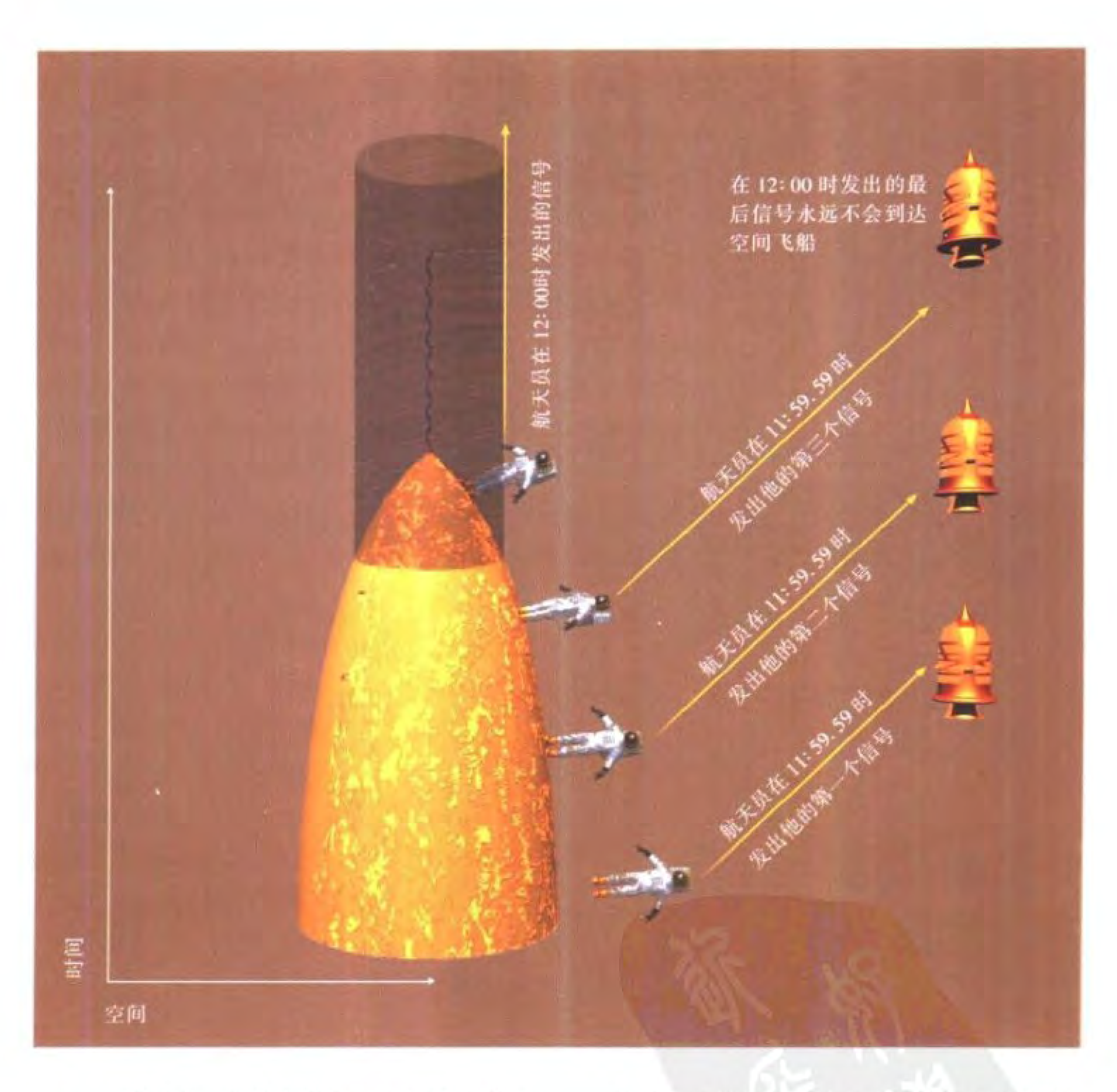


力拉力施加在周围的对象上。如果太阳是一个黑洞而且在转变成黑洞之前没有损失任何质量，则行星将仍然像现在这样围绕着它公转。

因此搜索黑洞的一种方法是寻找围绕着似乎是看不见的紧致的大质量物体公转的物体。若干这样的系统已被观测到。发生在星系和类星体中心的巨大黑洞也许是最令人印象深刻的(图 4.14)。

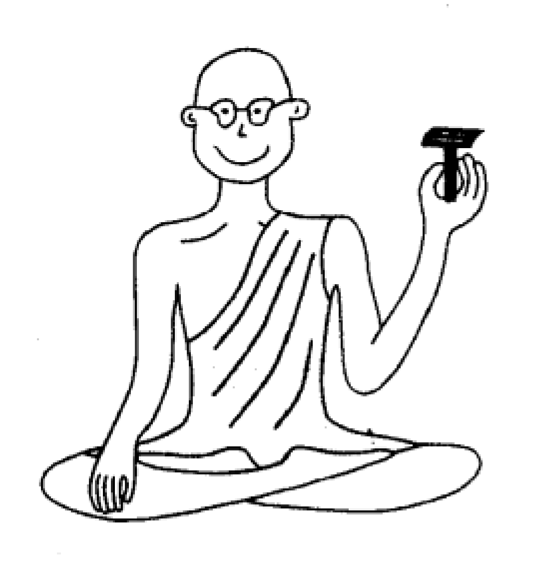
迄此讨论到的黑洞的性质还未触犯宿命论。一位落进黑洞并撞到奇点上去的航天员的时间将会终结。然而，在广义相对论中，人们可以在不同的地方随意地以不同的速率来测量时间。因此，人们可以在航天员接近奇点时加快他或她的手表，使之仍然记下无限的时间间隔。在时间距离图上，这个新时间的常数值的表面将会在中心拥挤在一起，刚好在奇性出现的点的下头。但是它们在远离黑洞的几乎平坦的时空中和通常的时间测度相一致(图 4.15)。

人们可以在薛定谔方程中使用这个时间，如果他知道初始的波函数，便能计算后来的波函数。这样，人们仍然有宿命论。然而，值得注意的是，在后期波函数的一部分处于黑洞之内，它不能被外界的人观察到。这样，一位明智地不落入黑洞的观察者不能往过去方向演化薛定谔方程并且计算出早先时刻的波函数。为了做到这一



上图显示一名航天员于11:59.57时在一颗正在坍缩的恒星上着陆，伴随着恒星收缩到临界半径以下。临界半径的引力强到信号都不能逃逸出来。他以规则的间隔从他的手表向围绕该恒量公转的空间飞船发送信号。

在远处观察该恒星的某人将永远看不到它穿越事件视界并且进入黑洞。相反地，该恒星仿佛停留在临界半径的紧外头，在恒星表面上的钟似乎缓慢下来并且停止。



无发结果。

点，他或她就需要知道黑洞之内的那一部分波函数。这包含有落进黑洞的物体的信息。因为一个给定质量和旋转速度的黑洞可由非常大量的不同的粒子集合形成，所以这可能是非常大量的信息。一个黑洞与坍缩形成它的物体的性质无关。约翰·惠勒把这个结果称为“黑洞无毛”。对于法国人而言，这正好证实了他们的猜疑。

当我发现了黑洞不是完全黑的时候，和宿命论的冲突就产生了。正如我们在第二章中看到的，量子理论意味着，甚至在所谓的真空中场也不能够精确地为零。如果它们为零，则它们不但有精确的值即位置为零，而且有精确的变化率即速度亦为零。这就违反了不确定性原理。该原理讲，不能同时很好地定义位置和速度。相反地，所有的场必须具有一定量的所谓的真空起伏（和在第二章中的单摆必须具有零点起伏的方式一样）。真空起伏可以几种似乎不同的方式解释，但是这几种方式事实上在数学中是等效的。从实证主义观点，人们可以随意选取任何对该问题最有用的图像。在这种情形下，使用下述的图像来理解真空起伏是非常有助的。在时空的某处同时出现的虚粒子对相互分离，再回到一块而且相互湮灭。“虚的”表明这些粒子不能被直接观测到，但是它们的间接效应能被测量到，而且它们和理论预言相符合的精度令人印象深刻(图 4.16)。

如果黑洞在场的话，则粒子对中的一个成员可以落入黑洞，留下另一个成员自由地逃往无穷远处（图 4.17)。从远离黑洞的某人的观点看，逃逸粒子就显得是被黑洞辐射出来。黑洞的谱刚好是我们从一个热体所预料到的谱，其温度和视界——黑洞的边界上的引力场成正比。换言之，黑洞的温度依赖于它的大小。

一个具有几倍太阳质量的黑洞的温度大约为百万分之一度的绝对温度，而一个更大的黑洞之温度甚至

黑洞温度

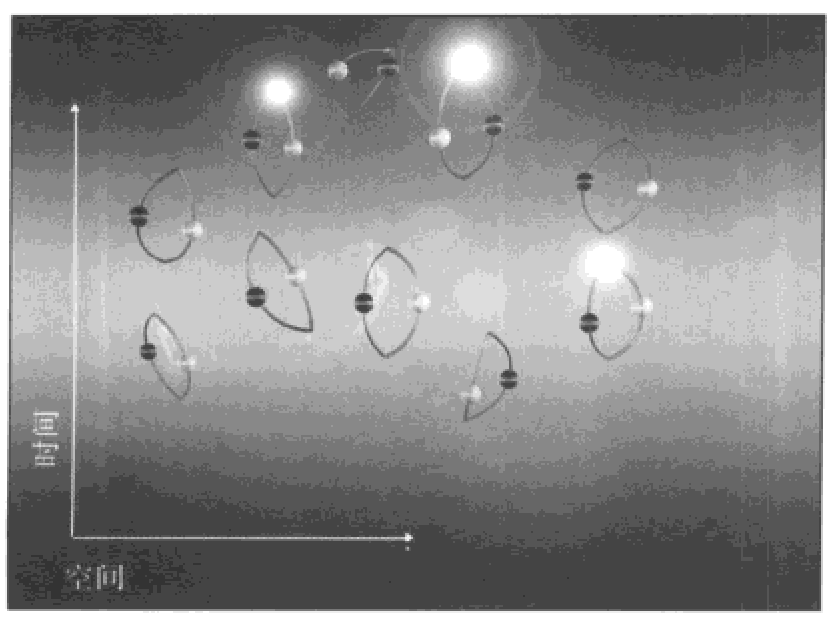
一个黑洞犹如一个具有温度(T)的热体一样发射辐射，其温度只与它的质量有关。更精确地讲，此温度由下式给出：

$$T=\frac{\hbar c^3}{8\pi kGM}$$

在此公式中符号(c)是光速，(ħ)是普朗克常数，(G)是牛顿引力常数，而(k)是玻尔兹曼常数。

最后，(M)代表黑洞质量，这样黑洞越小，其温度越高。这个公式告诉我们，几个太阳质量的一个黑洞，其温度大约只比绝对零度高一百万分之一度。





上图 4.17
在黑洞的事件视界邻近，虚粒子出现并相互湮灭。
粒子对中的一员落入黑洞，而它的伴侣自由逃逸。从事件视界外面看，黑洞正把逃逸的粒子发射出来。

左下图 4.16
在空虚的空间中、粒子对出现，引起简短的存在，然而再相互湮灭。

观察者永远看不到的事件

T

观察者的事件视界

观察者的历史

观察者的事件视界

常数时间面

图4.18
广义相对论场方程的德·西特解代表一个以暴胀方式膨胀的宇宙。在此图中时间用向上的方向，而宇宙的尺度用水平方向表示。空间距离增大得这么快，使远处星系来的光永远不能到达我们这里，从而存在一个事件视界。正如在黑洞中那样，这是我们不能观察到的区域的边界。

更低。这样，从这类黑洞出来的任何量子辐射完全被淹没在热大爆炸遗留下的2.7度的辐射，也就是我们在第二章中讨论过的宇宙背景辐射之中。人们也许可能检测到从小很多即热很多的黑洞来的辐射，但是似乎它们在附近也不很多。这是一个遗憾。如果有一个被发现，我就要得到诺贝尔奖。然而，我们拥有这种辐射的间接观测证据，它来自于早期宇宙。正如在第三章中描述的，人们认为宇宙的极早期历史经历了一个暴胀时期。宇宙在这一时期以不断增加的速率膨胀。这个时期的膨胀如此之快速，以至于有些物体离开我们太远，连它们的光线都从未抵达我们这里；在光线向我们传来



时，宇宙已膨胀得太多太快了。这样，在宇宙中存在一个视界，正如黑洞的视界那样，把以光线能抵达我们的区域和不能抵达的区域分隔开来(图 4.18)。

非常类似的论证表明，如同存在从黑洞视界来的辐射那样，也应该存在从这个视界来的热辐射。我们已经知道如何在热辐射中预期密度起伏的特征谱。在这种情形下，这些密度起伏会随着宇宙而膨胀。当它们的长度尺度超出事件视界的尺度时，它们就被凝固了，这样它们作为从早期宇宙残存下来的宇宙背景辐射的温度中的小变化，今天可以被我们观察到。这些变化的观测和热起伏的预言相互一致的程度令人印象深刻。

尽管黑洞辐射的观测证据有些间接，所以研究过这一问题的人都一致认为，为了和我们其他观测上检验过的理论相一致，它必然发生。这对于宿命论具有重要的含义。从黑洞来的辐射将带走能量，这表明黑洞将失去质量而变得更小。接下去，这意味着它的温度会上升，而且辐射率将增加。黑洞最终将到达零质量。我们不知如何计算在这一点所要发生的，但是仅有的自然而又合理的结果似乎应是黑洞完全消失。那么，波函数在黑洞里的部分以及它挟持的有关落入黑洞物体的信息的下场如何呢？第一种猜测是，当黑洞最后消失时，这一部分波函数，以及它携带的信息将会涌现。然而，携带信息不能不消费，正如人们收到电话账单时意识到的那样。

信息需要能量去负载它，而在黑洞的最后阶段只有很小的能量留下。内部信息逃逸的仅有的似乎可行的方式是，它连续地伴随着辐射出现，而



图 4.19
从黑洞视界出来的热辐射带走了正能量，因此减小了黑洞质量。随着它损失质量，黑洞的温度升高而且辐射率增大，这样它的质量损失得越来越快。我们不知道当质量变成极小时会发生什么，但是最可能的结果似乎是黑洞会完全消失。

不必等待到最后阶段。然而，根据虚粒子对的一个成员落进，而另一成员逃离的图像，人们预料逃离粒子与落入粒子不相关，或者前者不携带走有关后者的信息。这样，仅有的答案似乎是，在黑洞内的波函数中的信息丢失了(图 4.19)。

这种信息丧失对于宿命论具有重要的含义。让我们从头开始，我们注意到，即便你知道黑洞消失后的波函数，你也不能把薛定谔方程演化回去并且计算在黑洞形成之前的波函数。它是什么样子会部分地依赖于在黑洞中丢失的那一点波函数。我们习惯地以为，我们可以准确地知道过去。然而，如果信息在黑洞中丧失，情况就并非如此。任何事情都可能已经发生过。

然而，一般说来，人们诸如占星家和他们的那些咨询者对预言将来比回溯过去更感兴趣。初看起来，似乎



落到黑洞中的波函数部分的丧失不应妨碍我们预言黑洞外的波函数。但是,结果是这一丧失的确干扰了这一预言,正如我们在考虑爱因斯坦、玻里斯·帕多尔斯基和纳珍·罗森在 1930 年代提出的一个理想实验时能够看到的。

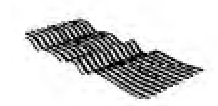
图 4.20
在爱因斯坦-帕多尔斯基-罗森理想实验中,观察者测量了一个粒子自旋,就将知道第二个粒子自旋的方向。

想象一个放射性原子衰变并在相反方面发出两个具有相反自旋的粒子。一位只看到其中一个粒子的观察者不能预言该粒子是往右还是往左自旋。但是如果观察者测量到它往右自旋,那么他或她就能确定地预言另一个粒子往左自旋,反之亦然(图 4.20)。爱因斯坦认为这证明了量子理论是荒谬的:另一个粒子现在也许在星系的另一边,而人们会立即知道它自旋的方向。然而,其他大多数科学家都同意,不是量子理论,而是爱因斯坦弄混淆了。爱因斯坦-帕多尔斯基-罗森理想实验并不表明人们能比光更快地发送信息。

图 4.21
虚粒子对具有一个波函数，这个波函数预言两个粒子具有相反自旋。但是如果一个粒子落入黑洞，便不可能确定地预言余下粒子的自旋

那正是荒谬的部分。人们不能选择其自己的粒子将被测量为向右自旋，这样人们不能指定远方观察者的粒子应向左自旋。

事实上，这个理想实验正好是黑洞辐射所发生的。虚粒子对有一波函数，它预言这两个成员肯定具有相反的自旋(图 4.21)。我们想做的是预言飞离粒子的自旋和波函数，如果我们能够观察到落入的粒子，我们便能做到这一点。但是那个粒子现在处于黑洞之内，不能测量得到它的自旋和波函数。正因为这样，人们无法预言逃逸粒子的自旋和波函数。它可具有不同的自旋和不同的波函数，其概率是各式各样的，但是它不能具有惟一的自旋和波函数。这样看来，我们预言将来的能力被进一步削减了。拉普拉斯的经典思想，即人们能同



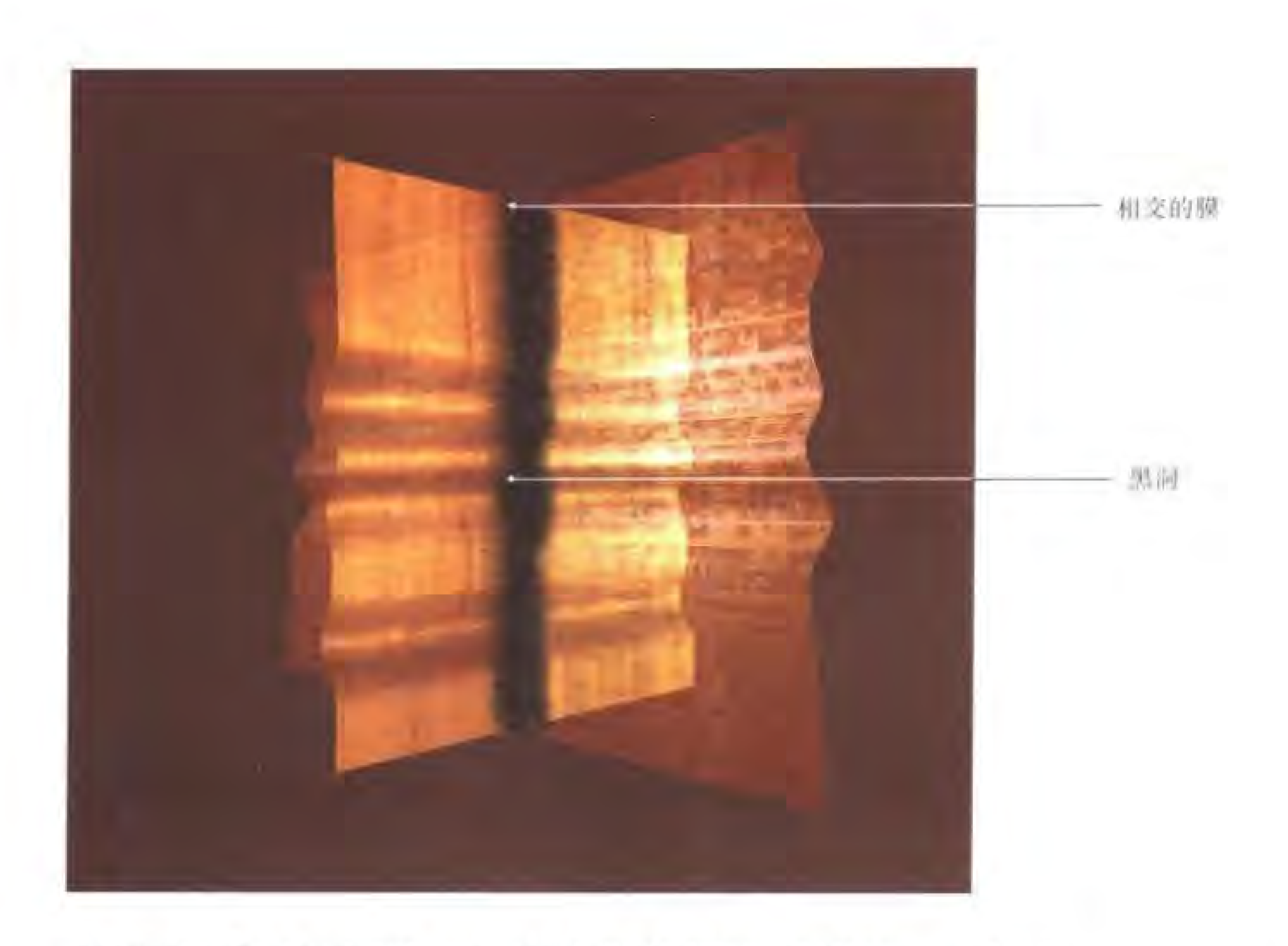
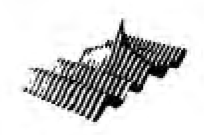
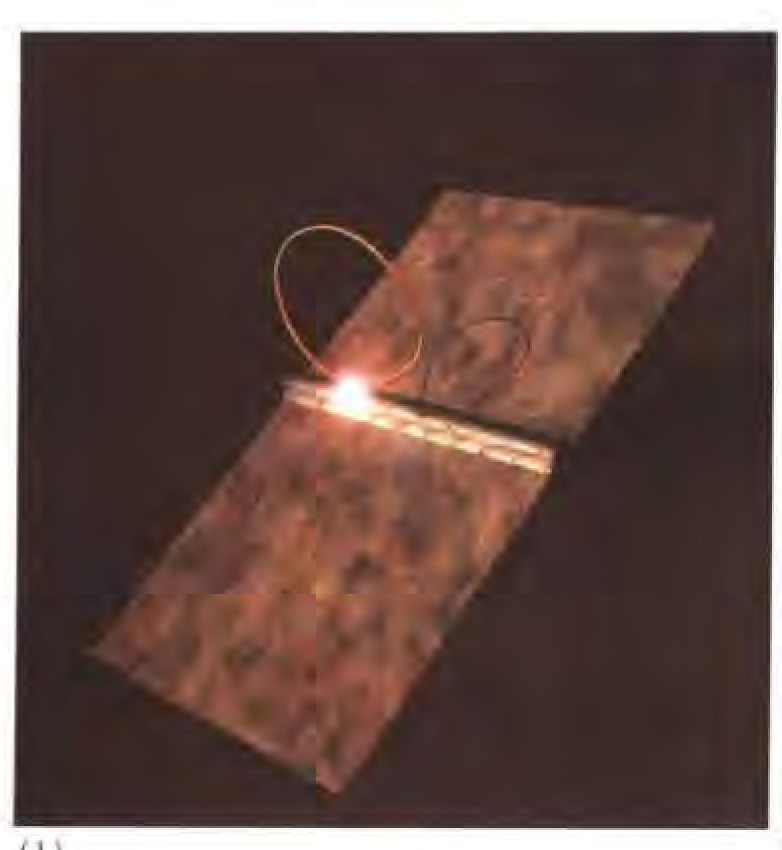


图 4.22
黑洞可被认为在时空的额外维中的 p－膜的相交.有关黑洞内部状态的信息作为波被储存在 p－膜上

时预言粒子的位置和速度，因为不确定性原理指出人们不能同时准确地测量位置和速度，必须被修正。然而，人们仍然能准确测量波函数并且利用薛定谔方程去预言未来应发生的事。这就允许人们确定地预言位置和速度的结合物——这是人们根据拉普拉斯思想所能预言的一半。我们能够确定地预言粒子具有相反的自旋。但是如果一个粒子落进黑洞，那么我们就不能对余下的粒子作确定的预言。这意味着在黑洞外不能确定预言任何测量：我们作出确定预言的能力被减低至零。这样，也许就预言将来而言，占星家和科学定律是半斤八两。

许多物理学家不喜欢这种宿命论的降低，因而建议可以某种方式从黑洞之内将信息取出。多少年来人





(1)



(2)

图 4. 23
一个落入黑洞的粒子可被认为是打到一个 **p－膜**上的一个闭合圈环 **(1)**。它会在 **p－膜**上激起波 **(2)**。波会相撞并且会使 **p－膜**的一部分变成一个闭合的弦而断裂开去 **(3)**。这就是黑洞发射出的一个粒子。

们相信可以找到保存这信息的某种方法，可惜这仅仅是一种虔诚的希望而已。但在 1996 年安德鲁·斯特罗明格和库姆朗·瓦法获得重大进展。他们采取把黑洞考虑成由许多称为 p－膜的建筑构件组成。

回想一下，可以把 p－膜认为是一张通过三维空间以及我们没注意到的额外七维的运动的薄片（见 125 页,图 4. 22）。在某些情形下,人们可以证明在 p－膜上的波的数目和人们预料的黑洞所包含的信息量相同。如果粒子打到 p－膜上,它们便会在膜上激起额外的波。类似地,如果在 p－膜上不同方向的波在某点相遇，它们会产生一个如此大的尖峰，使得 p－膜的一小片破裂开去,而作为粒子离开。这样,p－膜正如黑洞一样,能吸收和发射粒子(图 4. 23)。

人们可以将 p－膜当作有效理论；也就是说，我们





(3)

不需要相信实际上存在在平坦时空中运动的薄片，黑洞可以似乎像它们是由这种薄片组成的那样行为。这正如水，它是由亿亿个具有复杂的相互作用的 H_2O 分子构成。但是光滑的液体是非常好的有效模型。由 p－膜构成黑洞的数学模型给出的结果和早先描述的虚粒子对图像很相似。这样，从实证主义的观点看，至少对于一定种类的黑洞，它是一个同样好的模型。对于这些种类，p－膜模型和虚粒子对模型对发射率的预言完全一样。然而，这里存在一个重要差别：在 p－膜模型中，关于落入黑洞物体的信息将被储存在 p－膜上的波的波函数中。p－膜被认为是平坦时空中的薄片。因为这个原因，时间会平滑地向前流逝，光线的轨迹不会被弯折，而且波里的信息不会丧失。相反地，信息最终在来自 p－膜来的辐射中从黑洞涌现。这样，根据 p－膜模







型，我们可以利用薛定谔方程去计算将来的波函数。没有任何东西丧失，而时间将光滑地推移。在量子的意义上我们具有完整的宿命论。

那么其中哪种图像是正确的呢？部分波函数是否在黑洞中丢失了，或者正如p－膜模型建议的，所有信息再次跑出来？这是当代理论物理的一个突出的问题。许多人相信，新近的研究表明信息没有丧失。世界是安全和可预言的，而且不会发生任何意外事件。但是这不清楚。如果人们认真地对待爱因斯坦的广义相对论，人们必须允许时空自身打结，而信息在折缝中丧失的可能性。当星际航船探险号穿越一个虫洞，发生了一些意料之外的事。因为我正搭乘该船，并与牛顿、爱因斯坦和达他玩扑克，所以我知道此事。我大吃一惊。只要看看我的膝盖上出现了什么。



《星际航行》的一个镜头



第五章

护卫过去

时间旅行可能吗？

一种先进的文明能回返以前并改变过去吗？





Whereas Stephen W. Hawking (having lost a previous bet on this subject by not demanding genericity) still firmly believes that naked singularities are an anathema and should be prohibited by the laws of classical physics,

And whereas John Preskill and Kip Thorne (having won the previous bet) still regard naked singularities as quantum gravitational objects that might exist, unclothed by horizons, for all the Universe to see,

Therefore Hawking offers, and Preskill/Thorne accept, a wager that

> *When any form of classical matter or field that is incapable of becoming singular in flat spacetime is coupled to general relativity via the classical Einstein equations, then*

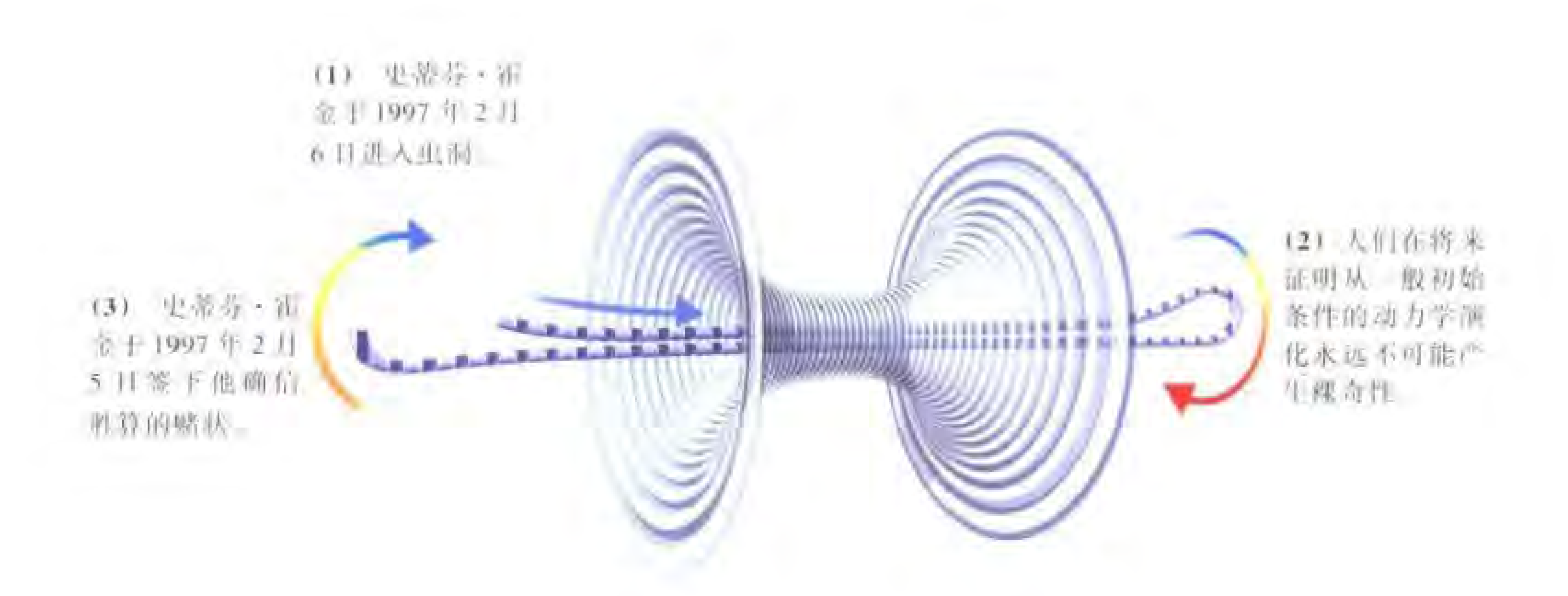
A dynamical evolution from generic initial conditions *(i.e., from an open set of initial data)* **can never produce a naked singularity** *(a past-incomplete null geodesic from $\mathcal{I}_+$).*

The loser will reward the winner with clothing to cover the winner's nakedness. The clothing is to be embroidered with a suitable, truly concessionary message.

Stephen W. Hawking **John P. Preskill & Kip S. Thorne**

Pasadena, California, 5 February 1997





我的朋友兼合作者基帕·索恩和我打过许多赌（见左下图）。他不是一位人云亦云的物理学家。这种品格使他具有勇气成为以实际的可行性来讨论时间旅行的第一位严肃的科学家。

在公开场合思考时间旅行是很微妙的。他要么面临反对把公币浪费在这么荒谬的规划上的声浪，要么被要求把这研究归于军事用途。无论如何，怎么保护我们自己免受拥有时间机器的人的攻击呢？他们也许能改变历史并且统治世界。我们之中只有很少的几个人鲁莽地研究这种在物理学圈子里政治上不明智的题目。我们利用技术术语描述时间旅行来做掩饰。



基帕·索恩

空间飞船继续沿着一个圈环穿越弯曲的时空航行。

空间飞船沿着一个巨大的圈环穿越弯曲的时空航行。

空间飞船在11：45时返回，比它预定出发的时间早15分钟。

空间飞船于12：00时出发。

图5.1





爱因斯坦的广义相对论是所有现代有关时间旅行讨论的基础。正如我们在早先章节中看到的，爱因斯坦方程描述宇宙中的物质和能量如何将空间和时间弯曲和变形，从而使空间和时间变成动力量。在广义相对论中某人由其腕表测量的私人时间总是增加，这正像在牛顿理论或者狭义相对论的平坦时空中一样。但是现在有了时空可能弯曲得这么厉害，使你在乘空间飞船出发之前即已返回的可能性(图 5.1)。

如果存在虫洞，也就是在第四章中提到的连接空间和时间的不同区域的时空管道，它就成为可能发生此事的一个方式。其思想是，你驾驶你的空间飞船进入虫洞的一个口，而在不同地方和不同时间处的另一个口出来(图 5.2)。



虫洞，如果它们存在的话，将会是空间中解决速度

极限问题的办法：正如相对论要求的，空间飞船必须以低于光速的速度旅行，这样要穿越星系就需要几万年。但是你可以在一餐饭的工夫通过虫洞到达星系的另一边并且返回。然而，人们能够证明，如果虫洞存在，你还可以利用它们在你出发之前即已返回。这样，你会以为能做一些事，譬如首先炸毁发射台上的火箭，以阻止你出发。这是祖父佯谬的变种：如果你回到过去在你父亲被怀胎之前将你祖父杀死，将会发生什么？（见138页，图5.3）

当然，只有你相信当你回到时间的过去时，你具有自由意志为所欲为，这才成为佯谬。本书不进行自由意



图5.2　孪生子佯谬的第二变种

(1)如果存在一个两边出口很靠近的虫洞，你就可以穿过该虫洞而且在同一时刻从虫洞出来。



空间飞船上
的虫洞口

地球上的
虫洞口

在 12: 00 时
从地球进入

在 10: 00 时在空
间飞船中出来

虫洞口搭
乘空间飞
船返回地
球!

空间飞船
的虫洞

(2) 人们可以想象让虫洞的一个口搭乘空间飞船进行长途旅行，而让虫洞的另一个口留在地球上。

(3) 因为孪生子佯谬效应，当空间飞船返回时，它所包含的虫洞口流逝的时间比留在地球上的口流逝的少。这意味着，如果你迈进地球上的口，你就能够在更早的时刻从空间飞船出来。



图 5.3
一颗通过虫洞进入更早时间的点燃子弹能否影响其射手呢?

宇宙弦

宇宙弦是长的具有微小截面的重的物体，它们可能在宇宙的早期阶段产生。宇宙弦一旦形成，它们就会因宇宙的膨胀而进一步伸展，而且一根单独的宇宙弦在现时刻可以横贯我们观察到的宇宙的整个尺度。

当代粒子理论暗示宇宙弦的发生。该理论预言，在宇宙的热的早期阶段，物质处于对称相，和液态水非常相像——它是对称的，在每一点每一方向上都相同，而不像冰晶体，它具有分立的结构。

当宇宙冷却下来，早期相的对称在相距遥远的区域会以不同的方式受到破坏。

结果，宇宙物质在那些区域中就停留在不同的基态上。宇宙弦便是在这些区域之间的边界上的物质的形态。因此它们的形成是如下事实的不可避免的结果，即不同区域不可能具有相同的基态。

志的哲学讨论。取而代之，它只集中讨论物理定律是否允许时空被卷曲得如此之甚，使得诸如空间飞船的宏观物体能回到自己的过去。根据爱因斯坦理论，空间飞船必须以低于光的局部速度旅行并沿着所谓的类时轨迹通过时空。这样，人们可以用技术术语来表述这个问题：时空是否允许封闭的类时曲线——也就是说，它会一次又一次地返回其出发点吗？我将把这类路径称为“时间圈环”。

我们可以试图在三个水平上回答这个问题。首先是爱因斯坦的广义相对论，它假定宇宙具有定义很好的没有任何不确定性的历史。我们对这一经典的理论有相当完整的图像。然而，正如我们已经看到的，因为我们观察到物质遭受不确定性和量子起伏的制约，这个理论不能是完全正确的。

因此我们能够在第二水平，也就是在半经典理论上探索有关时间旅行的问题。在这个水平上，我们按照量子理论来考虑物质的行为，它具有不确定性和量子起伏，但是时空是很好定义的经典的。这里的图像不甚完整，但是我们至少有了如何进展的一些概念。



图 5.4
时空允许闭合的类时曲线，使之一而再再而三地返回某出发点吗?

哥德尔的不完备性定理

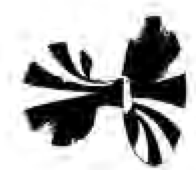
1931年数学家库尔特·哥德尔证明了他的著名的有关数学性质的不完备性定理。该定理陈述，在任何公理化形式系统，譬如现代数学中，总存留在定义该系统的公理的基础上既不能证明也不能证伪的问题。换言之，哥德尔证明了，存在用任何一族规则或者步骤不能解决的问题。

哥德尔定理对数学立下了基本的极限。由于它抛弃了被广泛接受的信念，即数学是一个基于单独逻辑基础的协调而完备的系统。哥德尔定理、海森堡的不确定性原理以及跟随甚至一个决定性的变成混沌的演化在实际上的不可能性形成科学知识的局限性的核心，这种局限性只有在20世纪才被意识到。

最后，存在完整的量子引力论，而不管其最终是什么样子的。在此理论中，不仅物质而且时间和空间自身都是不确定的而且起伏涨落，甚至连如何去提出时间旅行是否可能的问题都不清楚。也许我们充其量能做到的只是询问，在几乎经典的并摆脱了不确定性的时空区域的人们会如何解释他们的测量。他们会认为在强引力和大量子涨落的区域中已经发生了时间旅行吗?

从经典理论开始：狭义相对论（没有引力的相对论）不允许时间旅行，早先知道的弯曲的时空也不行。所以当1949年发现哥德尔定理（见框中文字）的库尔特·哥德尔发现了一个时空时，爱因斯坦大吃一惊。这个时空是充满了旋转的物质，通过每一点都有时间圈环的宇宙（图5.4）。

哥德尔解需要一个宇宙常数，自然中是否存在宇宙常数仍不清楚，但是接着找到了其他无需宇宙常数的解。特别有趣的一个解是两根宇宙弦相互快速穿越的时空。



宇宙弦不应该和弦理论中的弦相混淆，虽然它们并非完全无关。它们是具有长度并只有微小截面的物体。在某些基本粒子的理论中预言它们会发生。一根单独宇宙弦外面的时空是平坦的。然而，这是切割去了一个楔子的平坦时空，弦处于楔子的锋刃端点。它像是一个圆锥：取来一大张圆纸，切去一块尖角刚好在圆心的楔形，再将余下部分的两个切缘粘在一起，这样你就得到一个圆锥。这代表了宇宙弦存在的时空(图 5.5)。



图 5.5

请注意，因为圆锥的表面是你开始使用的同样的平坦纸张(切去楔形)，除了尖顶外，你仍然可以称它是“平坦的”。围绕有尖顶的一个圆周长比以同样距离围绕原先的圆纸中心的圆周长更短，换言之，因为失去一块，所以围绕尖顶的圆周比平空间中的同半径的圆周更短。这个事实表明，圆锥尖顶有曲率(图 5.6)。

类似地，在宇宙弦的情形下，从平坦时空取走楔形缩短了围绕弦的圆周，但并不影响时间或者沿弦的距离。这意味着围绕着一根单独的弦的时空不包含任何时间圈环，所以不可能旅行到过去。然而，如果还存在第二根相对于第一根运动的弦，其时间方向将是第一根弦的时间和空间方向的组合。这表明，从和第一根弦一道运动的人看来，由于第二根弦被切走的楔形缩短了空间距离和时间间隔(图 5.7)。如果两根宇宙弦以接近光速作相对运动，则围绕着两根弦运动的时间可被节省得这么厉害，使得还未出发即已到达。换言之，存在时间圈环使人们可以旅行到过去。

宇宙弦时空包含有正能量密度的物质，这是和我们知道的物理学相一致。然而，这种产生时间圈环的卷曲一直延伸到空间的无穷处，并且回到时间的无限过去。

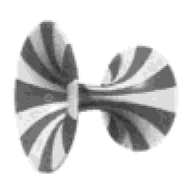
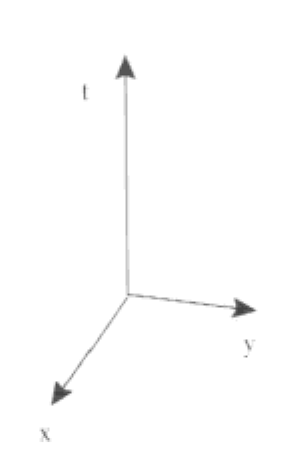
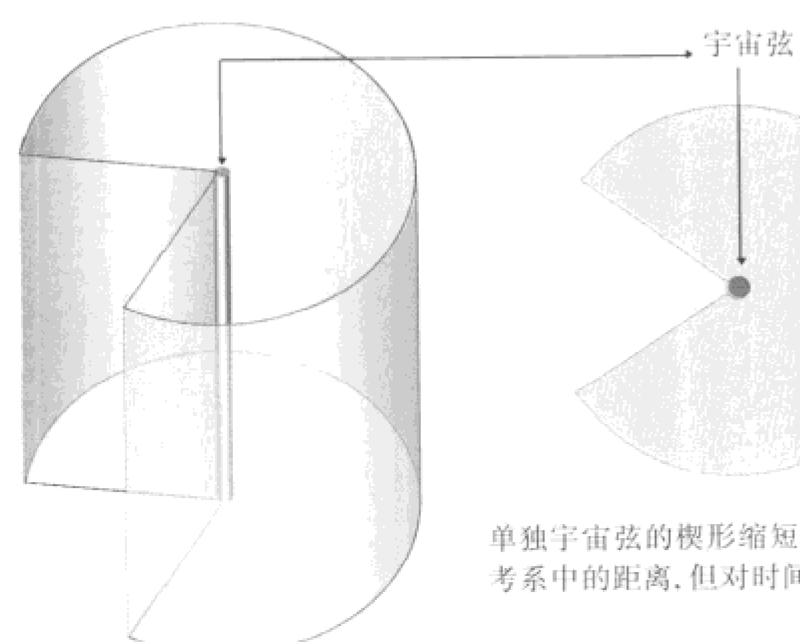
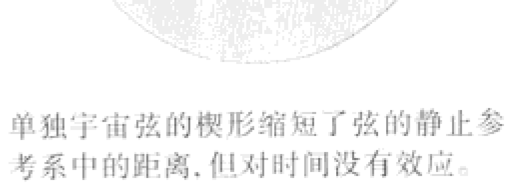


图 5.6



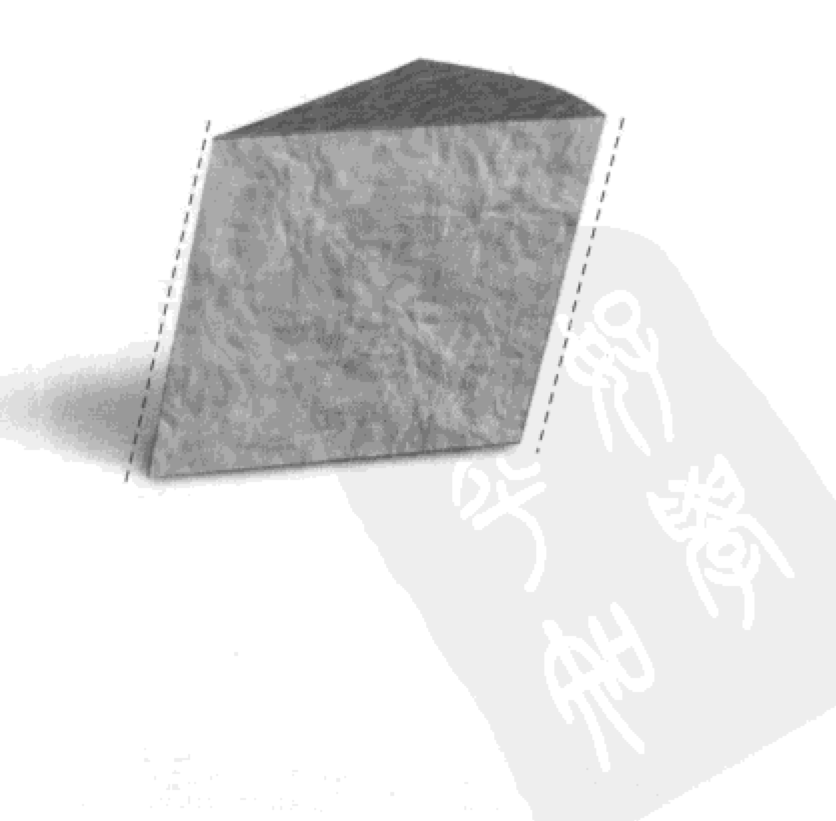
从时空中切除的楔形，其锋刃方向不相平行。





单独宇宙弦的楔形缩短了弦的静止参考系中的距离，但对时间没有效应。

图 5.7



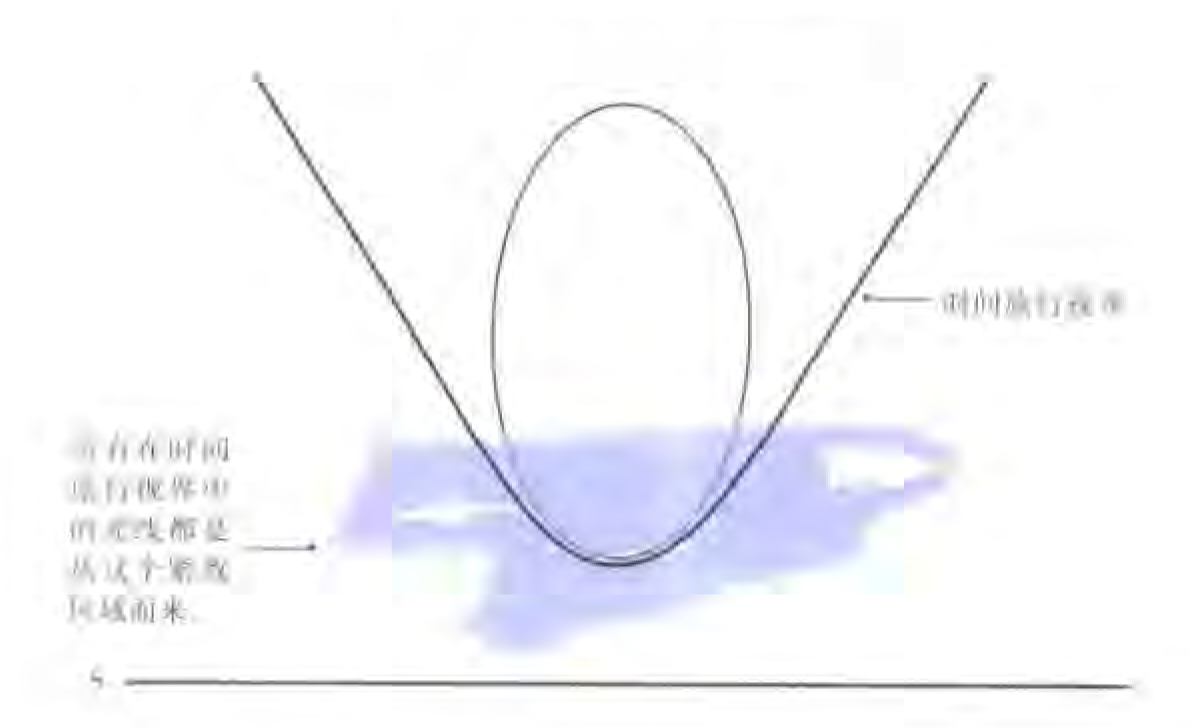
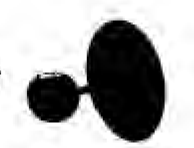


图 5.8
即使是最先进的文明，也只能在有限的区域内翘曲时空。时间旅行视界，即时空中可以旅行到一个人的过去的部分的边界是由从有限区域涌现的光线组成的。

这样，这些时空是和在它们中的时间旅行一道被创生的。我们没有理由相信我们自己的宇宙是以这种卷曲的方式创生的，况且我们没有来自将来的访客的可靠证据（我不太相信所谓的阴谋理论，说幽浮来自于未来，政府知悉这一切并包庇之，政府经常泄漏秘密）。因此，我假定在遥远的过去，更准确地讲，在我称为 S 的通过时空的某个面的过去不存在时间圈环。这个问题就变成：某种先进的文明能建造时间机器吗？也就是说，能不能把 S 未来的时空（在图中处于 S 面之上）修正，使时间圈环出现在有限的区域内？我说有限区域是因为不管该文明变得多么先进，它大抵也只能控制宇宙的有限部分。

在科学中，问题的正确表述通常是解决它的钥匙，而这就是一个好例子。为了定义一台有限的时间机器意味着什么，我回到自己早期的某些研究。在存在时间圈环的时空区域是可能进行时间旅行的。时间圈环是





以低光速旅行但由于时空的卷曲仍能回到出发的地方和时间的路径。由于我已假定在遥远的过去没有时间圈环，就必须存在我称作时间旅行的“视界”，这是把时间圈环区域和没有它们的区域分隔开来的边界(图 5.8)。

时间旅行视界和黑洞视界很相像。黑洞视界由刚好不落入黑洞的光线形成，而时间旅行视界由与自身相遇的光线的边缘形成。我把以下作为我称作时间机器的有限生成视界的判据，也就是全部从一有界区域出现的光线形成的视界。换言之，它们不是起源于无限处或奇点处，而是起源于包含时间圈环的有限区域，这是我们先进文明正要创造的那一类区域。

那么问题就变成：某种先进文明能建造一个时间机器吗？

我们采用这个定义作为时间机器的基点，有利于使用彭罗斯和我在研究奇点和黑洞时发展的技巧。我甚至不用爱因斯坦方程就能证明，一般来讲，一个有限生成视界包含一根实际上和自身相遇的光线——也就是一根不断地返回到同一点的光线。光线每绕一圈就被蓝移一次，这样像就越变越蓝。光脉冲的波峰越来越拥挤，而光线用来绕一圈的时间间隔越来越短。事实上，以光粒子自身的时间测度来定义，它只有有限的历史，即使它在有限的区域内不断转圈而且不撞到曲率奇点上去。



图 5.9　时间旅行的危险

右下图 5.10
黑洞辐射并损失质量的预言意味着，量子理论使负能量通过视界流进黑洞。为了使黑洞尺度缩小，视界上的能量密度必须为负，这正是建造一个时间机器所需要的征兆。

人们也许不在乎光粒子是否在有限的时间内完成其历史。但是我还能证明存在以低于光速运动的并且只有有限持续时间的路径。这些可以是一些被陷落在视界之前的有限区域中的观察者的历史，他们越来越快地绕着圈子，并在有限的时间里达到光速。这样，如果在飞碟中的一名美艳的外星人邀你进入她的时间机器，小心止步。你也许会落入其中的一个仅有有限持续时间的重复历史的陷阱中去(图 5.9)。

这些结果与爱因斯坦方程无关，但是只依赖于在有限区域中时空卷曲产生时间圈环的方式。然而，现在我们可以诘问，先进文明必须使用何种物质去卷曲时空，以建成一台有限尺度的时间机器。它能处处均有正的质量密度，正如在我早先描述过的宇宙弦时空中那样吗？宇宙弦时空不满足我的时间圈环在有限区域中出现的要求。然而人们会以为这仅仅是因为宇宙弦是无限长的。他也许会想象用有限长宇宙弦圈环建造一个有限时间机器，而且处处能量密度为正。使像基帕这样想回到过去的人失望是很遗憾的事，可惜在处处能量密度为正的条件下，这是实现不了的。我能证明，你需要负的能量才能建造有限时间机器。

在经典理论中能量密度总是正的，这样在这个水平上有限尺度的时间机器就被排除了。然而，在半经典理论中情形就不同了。在半经典理论中人们认为物质行为受量子理论制约，而时空是很好定义并且是经典的。正如我们已经看到的，量子理论的不确定性原理意味着，场甚至在表观上空虚的空间中也总是上下起伏，并且具有无穷的能量密度。这样，为了得到我们在宇宙中观察到的有限的能量密度，人们必须减去一个无限



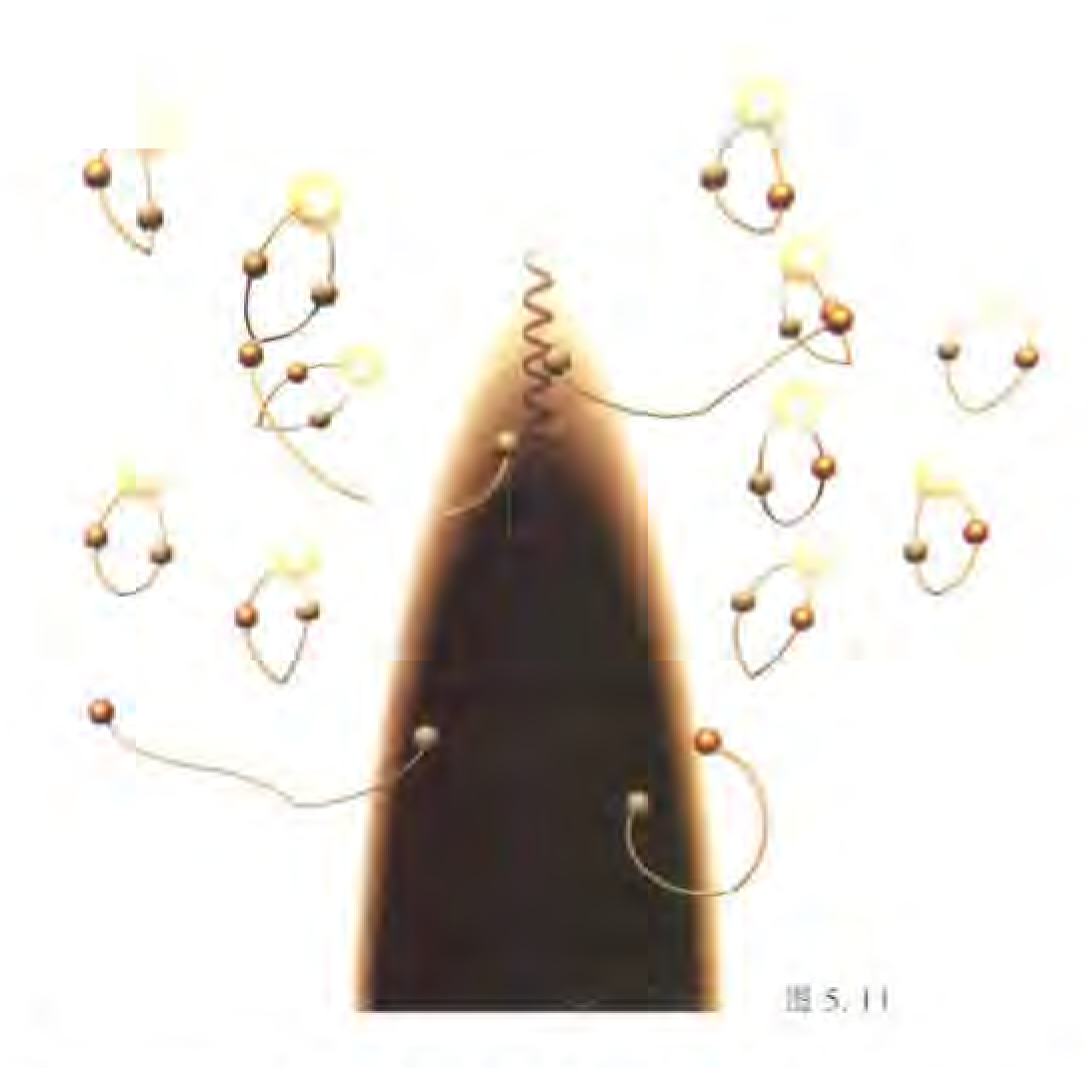


图 5.11

大的量。这一减除可以使能量密度至少在局部上为负。甚至在平坦空间中，人们能找到能量密度在局部为负的量子态，虽然其总能量是正的。人们也许极想知道，这些负值究竟能否使时空以适当的方式卷曲从而建造有限时间机器。但是它们似乎理当如此。正如我们在第四章中看到的，量子起伏意味着甚至表观上空虚的空间也充满了虚粒子对，它们同时出现，相互分开，然后回到一起并相互湮灭(图 5.10)。虚粒子对的一个成员将具有正能量，而另一成员负能量。当一个黑洞存在时，负能量成员能够落进，而正能量成员能逃向无限远，它在那里作为从黑洞携带走正能量的辐射而出现。负能粒子的落进引起黑洞损失质量并慢慢蒸发，其视界的尺度在缩小(图 5.11)。



图 5.10

具有正能量密度的通常物质具有吸引引力效应，而



我的孙子
威廉·麦肯锡·史密斯

且弯曲时空，使光线向相互方向弯折——正如同在第二章中橡皮膜上的球总是使小滚珠往它滚去而从不往外滚开一样。

这意味着黑洞视界面积只能随时间增大，而决不缩小。为了使黑洞视界的尺度缩小，视界上的能量密度必须是负的并且弯曲时空使得光线相互发散开去。这是在我女儿出生后不久上床时首次意识到的。我除了告诉你我有了孙子外，不愿意说这发生于多久以前。

黑洞的蒸发表明在量子水平上能量密度有时可以是负的并且在建造时间机器需要的方向上弯曲时空。这样我们可以想象，某一非常先进的文明能将事情安排妥当，使能量密度足够负，从而形成诸如空间飞船那样的宏观物体能利用的时间机器。然而，在黑洞视界和时间机器视界之间有一重要差别。前者是由一直不断前进的光线组成，而后者包含有不断转圈的闭合光线。一个沿着这种闭合轨道运动的虚粒子会不断重复地把它基态能量带回到同一点。因此，人们可以预料，在视界——也就是时间机器的边界上的能量密度是无限的。时间机器是人们可以旅行到过去的区域。在一些简单得可做准确计算的背景中的直截明了的计算中，这一点得到了证实。这表明穿过视界进入时间机器的人或者空间探测器会被辐射爆所毁灭(图5.12)。这样，就时间旅行而言未来是黑暗的——或者毋宁说是令人眩目的白?

物体的能量密度依它所处的态而定，所以先进的文明也许可以把不断围绕一个闭合圈环运动的虚粒子“逐出”或取掉，使得时间机器边界上的能量密度变成有限的。然而，这样的时间机器是否稳定仍然不清楚：最小的扰动，譬如某人穿过视界进入该时间机器，可能

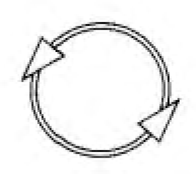


激活了循环的虚粒子并引发闪电。这是一个物理学家应该能自由讨论而不被嘲笑的问题。即便结果是时间旅行不可能，我们也理解了为何如此，而这一点是重要。

图 5.12
当人们越过时间旅行视界时，会被辐射的闪电摧毁。

为了确定地回答这个问题，我们不仅需要考虑物质场的，而且也要考虑时空本身的量子起伏。人们也许预料到，这些会引起光线的轨迹以及整个时序概念上的朦胧模糊。的确，因为时空的量子起伏意味着视界不是准确定义的，人们可以把来自黑洞的辐射认为是泄漏。因为我们还没有量子引力的完整理论，很难说时空起伏的效应应是怎样的。尽管如此，我们能指望从在第三章中描述的费因曼对历史求和中得到一些提示。

每一个历史都是弯曲时空以及其中的物质场。由于



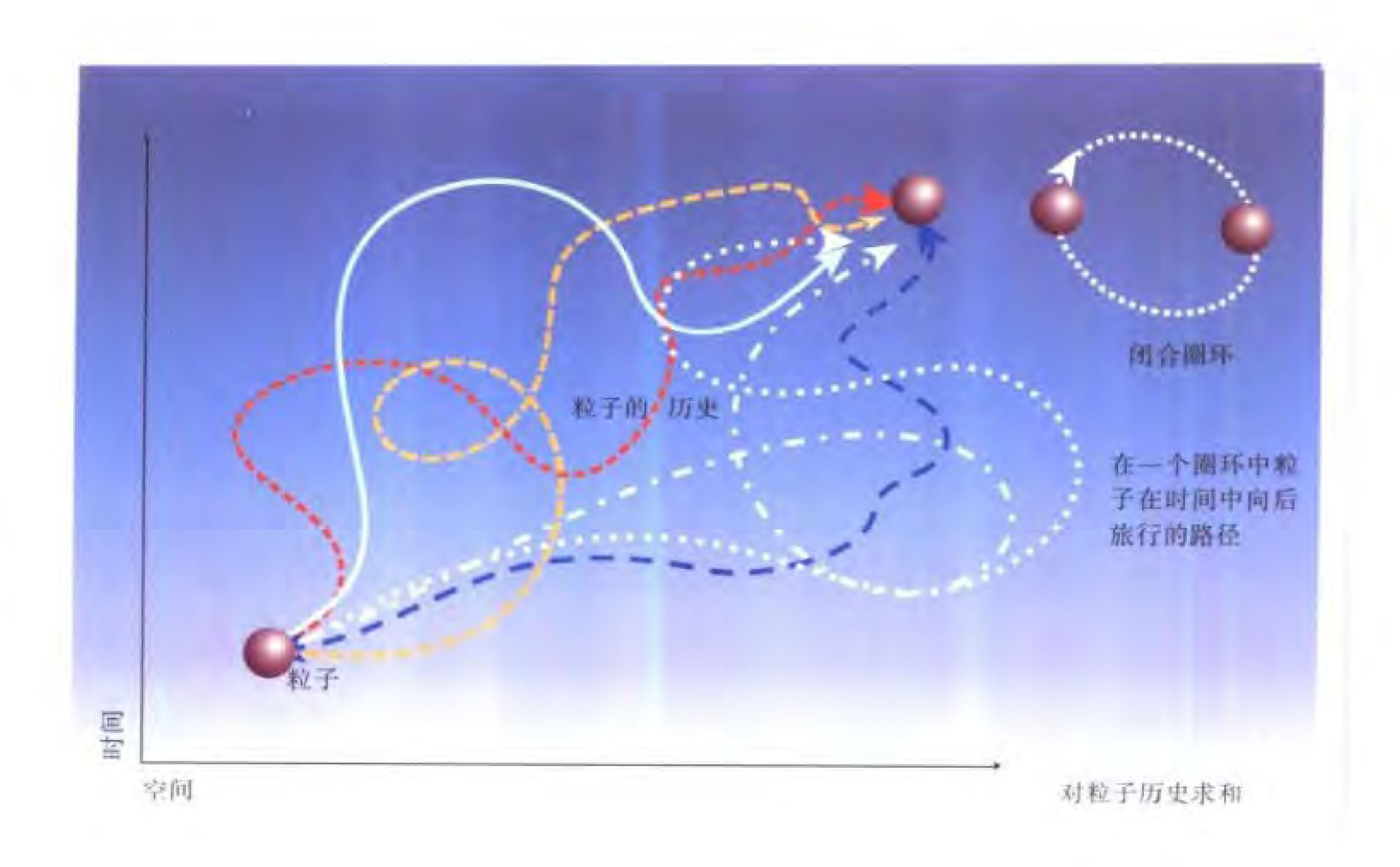
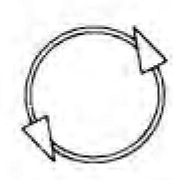


图 5.13
费因曼的历史求和必须包括粒子在时间中往回走的历史、甚至还包括在时间和空间中的闭合圈环。

我们打算对所有可能的历史，而不仅是那些满足一些方程的历史求和，这个求和应当包含卷曲到足以旅行到过去的时空在内(图 5.13)。这样，问题就变成，为何时间旅行不到处发生呢？其答案是，时间旅行的确发生于微观尺度上，但是我们觉察不到。如果人们将费因曼的历史求和思想应用于一个粒子上，他就必须包含粒子旅行得比光还快甚至向时间过去旅行的历史。尤其是，存在粒子在时间和空间中的一个闭合圈环上不断循环的历史。这就像影片《圣烛节》中的记者必须不断地重复过同一天一样(图 5.14)。

人们不能用粒子检测器来直接观测这种处于闭合



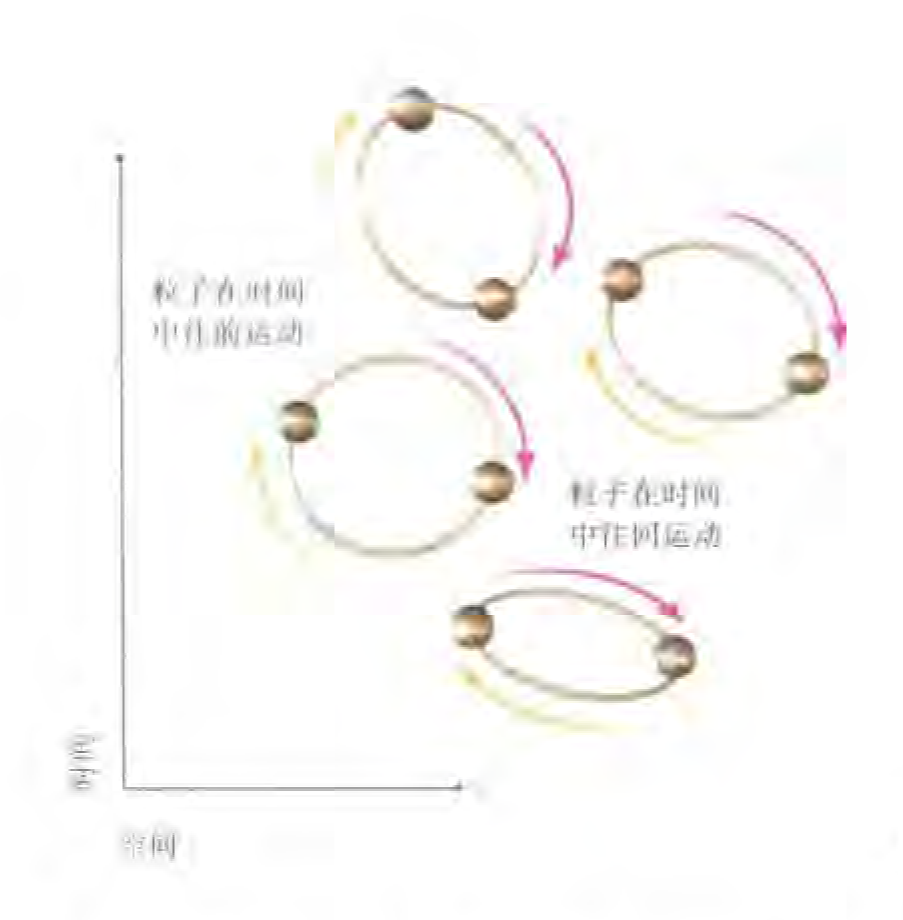


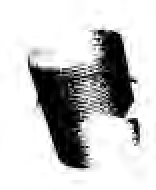
图 5. 14

圈环历史中的粒子。然而,在许多实验中已经测量到它们的间接效应。有一个实验是由在闭合圈环中运动的电子引起的氢原子光谱的微小位移。另一个实验是两片平行金属板之间的很小的力,这是由于可适合于平板之间的闭合圈环历史比适合于外面区域的稍少这一事实引起的——卡西米尔效应的另一种等效解释。这样,实验验证了闭合圆环历史的存在(图 5. 15)。





人们也许会争辩道,由于闭合圈环历史甚至在固定的背景诸如平空间中发生,它们和时空卷曲有何相干。但是近年我们发现物理学中的现象通常具有对偶的同样成立的描述。人们可以等价地说,粒子在给定的背景中沿一个闭合圈环运动,或者粒子固定不动而空间和时间围绕着它起伏。这只不过是你是首先对粒子轨迹求和然后再对弯曲时空求和,还是以相反的顺序求和的问题。



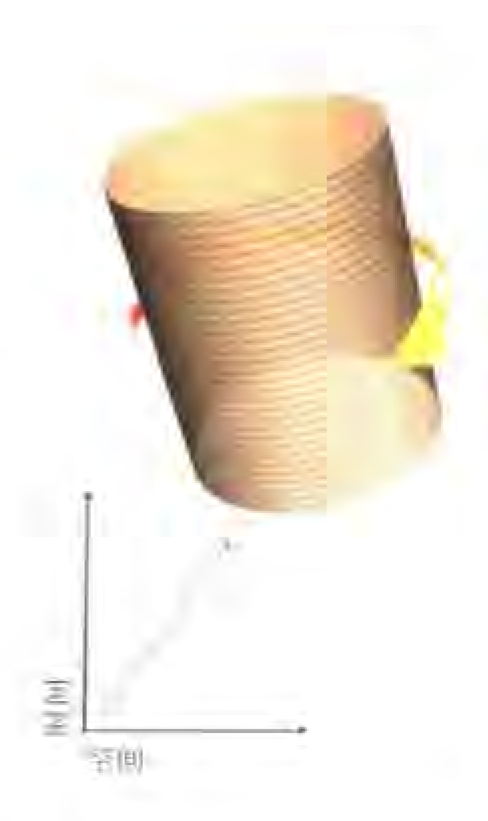


图 5.16
爱因斯坦宇宙像是一个圆柱面，它在空间中有限而在时间中不变。因为其有限的尺度，它可以在任何地方的速度都比光速更低的情形下旋转

因此，量子理论看来允许在微观的尺度上的时间旅行。然而，这对于科学幻想、诸如你回到过去杀死你祖父的目的没有多大用处。因此，问题就变成：在对历史求和中的概率能否在具有宏观时间圈环的时空附近取得峰值呢？

人们可以这样研究这个问题，考虑在一系列越来越接近允许时间圈环的时空背景中的物质场的历史求和。人们预料，在时间圈环首次出现时刻会出现某种戏剧性事件，而这正是被我和我的一名学生迈克·卡西迪研究的一个简单例子所证实的。

在我们的一系列研究中的背景时空和所谓的爱因斯坦宇宙紧密相关。当爱因斯坦相信宇宙在时间上是静止不变，既不膨胀又不收缩时提出了这种时空（见第一章）。在爱因斯坦宇宙中时间从无限的过去向无限的将来流逝。然而，空间方向是有限的并且自身闭合，如同地球的表面一样，只是多了一维。人们可以把这时空画成一个圆柱，长轴是时间方向，而截面是三个空间方向（图 5.16）。

因为爱因斯坦宇宙不膨胀，所以它不代表我们在其中生活的宇宙。尽管如此，因为它简单，人们可以作对历史的求和，所以在讨论时间旅行时利用它作为背景很方便。暂时忘记一下时间旅行，考虑在爱因斯坦宇宙中围绕着某个轴旋转的物质。如果你位于轴上，你可以留在空间的同一点，正如你站在儿童旋转木马的中心。但是如果你不在轴上，你就以围绕着轴旋转的方式在空间中运动。你离开轴越远，就运动得越快（图 5.17）。这样，如果宇宙在空间方向是无限的，则离开轴足够远的地方必须旋转得比光还快。然而，因为爱因斯



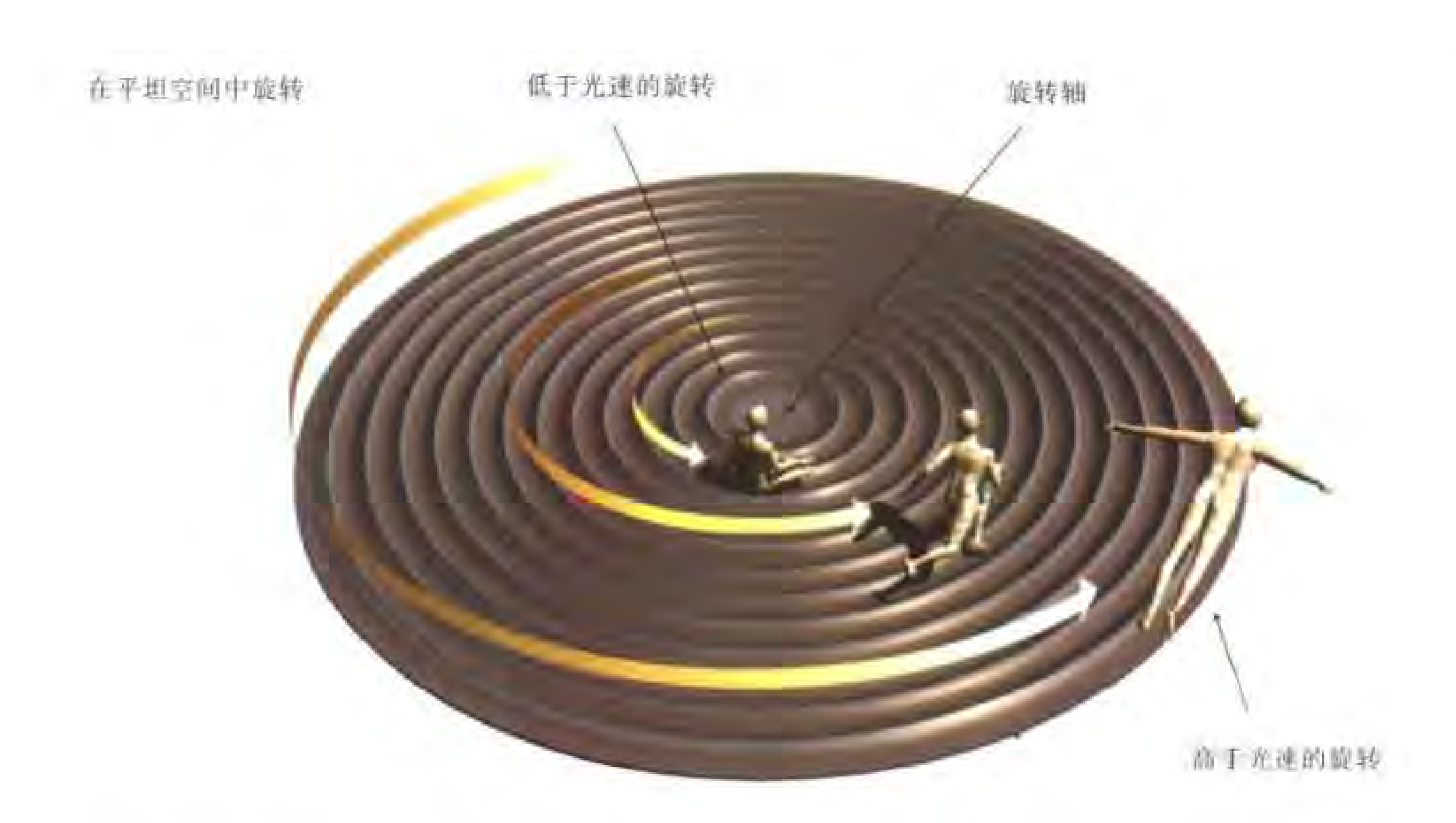
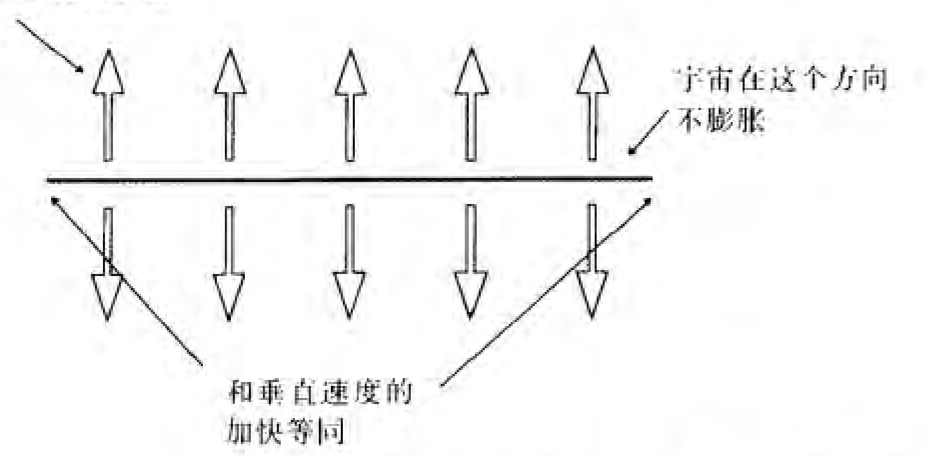


图 5.17
在平坦空间中刚体在远离其轴处运动得比光速还快。

坦宇宙在空间上是有限的，所以就存在一个旋转的临界速度，低于这个临界速度时宇宙中任何部分都旋转得比光慢。

现在考虑对一个旋转的爱因斯坦宇宙中的粒子历史求和。当旋转很慢时，对于给定的能量粒子历史可以采用许多路径。这样对在这样的背景中的所有粒子求和就会得到大的幅度。这意味着，在对所有弯曲时空的历史求和中这个背景的概率是高的，也就是说，它是更可能的历史之一。然而，随着爱因斯坦宇宙的旋转速度达到临界值，使得它外缘的运动速度达到光速，在边缘上只存在一个经典允许的粒子路径，也就是以光速运动的路径。这意味着对粒子历史的求和将很小。这样，对所有弯曲时空历史求和中这些背景的概率很低。也就是说，它们是最不可能的。

图 5.18 具有闭合的类时曲线的背景



旋转的爱因斯坦宇宙和时间旅行以及时间圈环有何相干呢？其答案是，它们和其他允许时间圈环的背景是数学上等价的。这些其他背景是在两个空间方向膨胀的宇宙。该宇宙在第三个空间方向不膨胀，这个方向是周期性的。这也就是说，如果你在这个方向走一定的距离，就会回到出发点。然而，每次你在第三个空间方向走一圈，你在第一和第二方向的速度都被加快上去（图5.18）。

如果加快得很小，就不存在时间圈环。然而，考虑一个加快不断增加的背景的序列。当加速达到某一临界值时时间圈环就要出现。这一临界加快对应于爱因斯坦宇宙的临界旋转速度，这是可以想见的。由于在这些背景中对历史求和计算是数学上等效的，人们可以得出结论，当这些背景达到实现时间圈环需要的卷曲时，它们的概率趋向零。这



就支持了我在第二章末提到的所谓的时序防卫猜测：物理定律协同防止宏观物体的时间旅行。

基帕能回到过去并杀死其祖父的概率是 $1/10^{10^{60}}$。

换言之，比一后面跟万亿亿亿亿亿亿个零分之一还要小。

虽然历史求和允许时间圈环，其概率极为微小。基于我早先提及的对偶性论证，我估计基帕·索恩能回到过去并杀死其祖父的概率小于一后面跟一万万亿亿亿亿亿亿亿个零分之一。

那是相当小的概率，但是如果你仔细看基帕的像，你可以在边缘上看到一点模糊。那对应于某个杂种从未来回来并杀死其祖父，因此他并不真的在那里的微弱的可能性。

作为赌徒，基帕和我会为此而打赌。麻烦在于我们不能相互打赌，因为现在我们两人都站在同一边。另一方面，我不愿和其他任何人打赌。他也许来自未来并且知道时间旅行是可行的。

你也许想知道这一章是否为政府包庇时间旅行的一部分。你也许是对的。



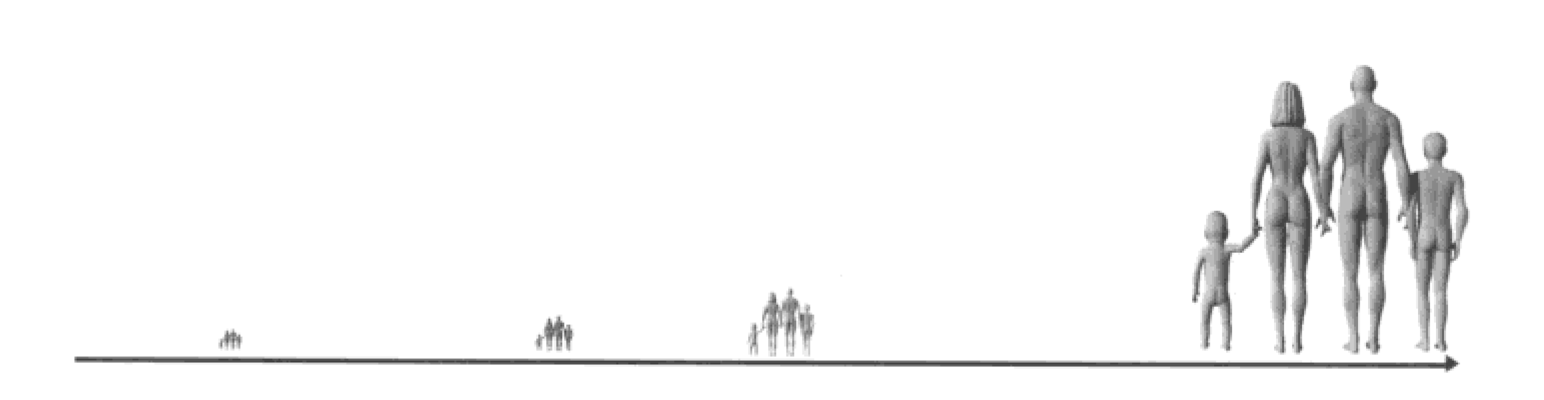


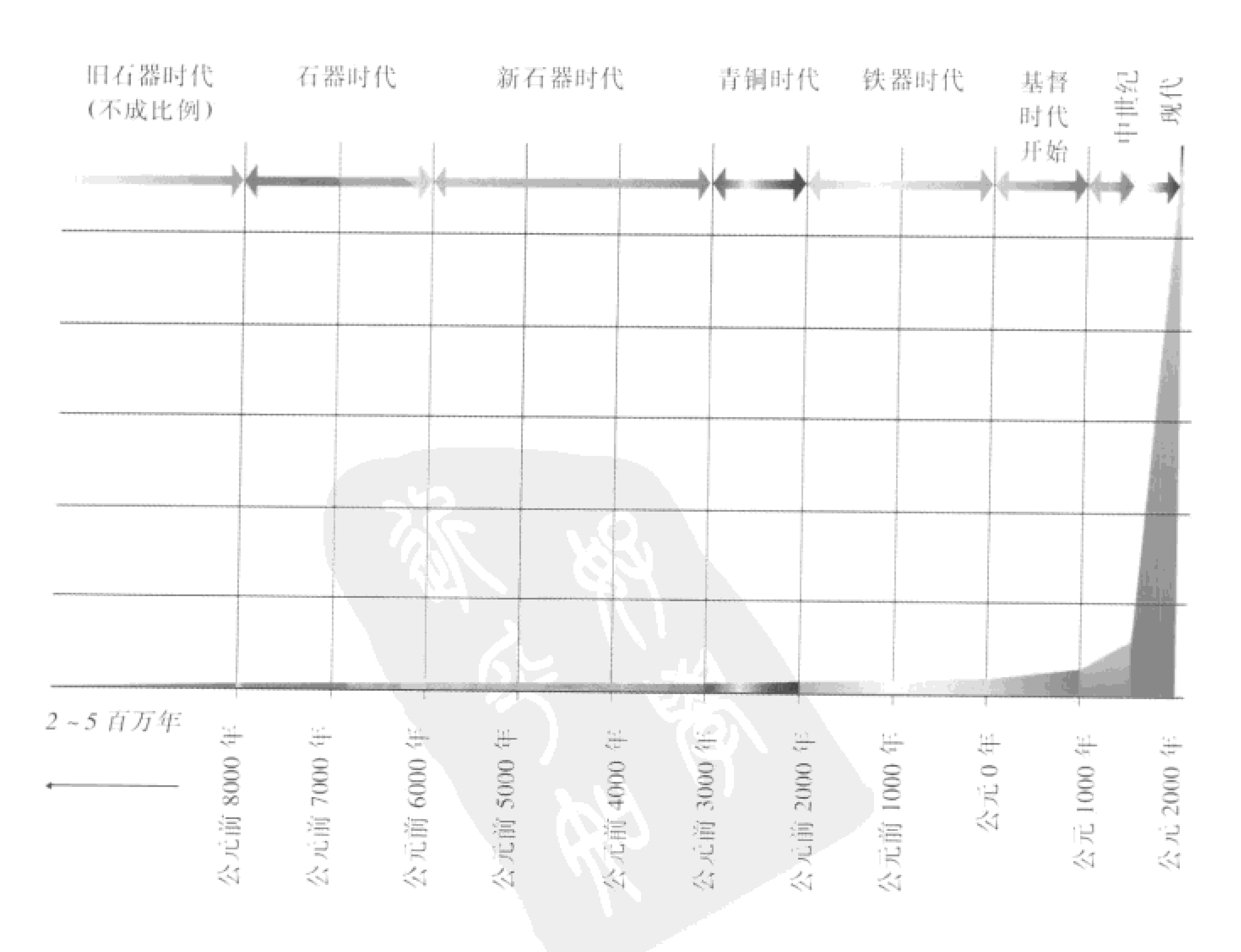
第六章
我们的未来？《星际航行》可行吗？

生物和电子生命将如何不断加速发展其复杂性。



图 6.1 人口增长




旧石器时代
(不成比例)
石器时代
新石器时代
青铜时代
铁器时代
基督
时代
开始
中世纪
现代
10亿人
2~5百万年
公元前8000年
公元前7000年
公元前6000年
公元前5000年
公元前4000年
公元前3000年
公元前2000年
公元前1000年
公元0年
公元1000年
公元2000年



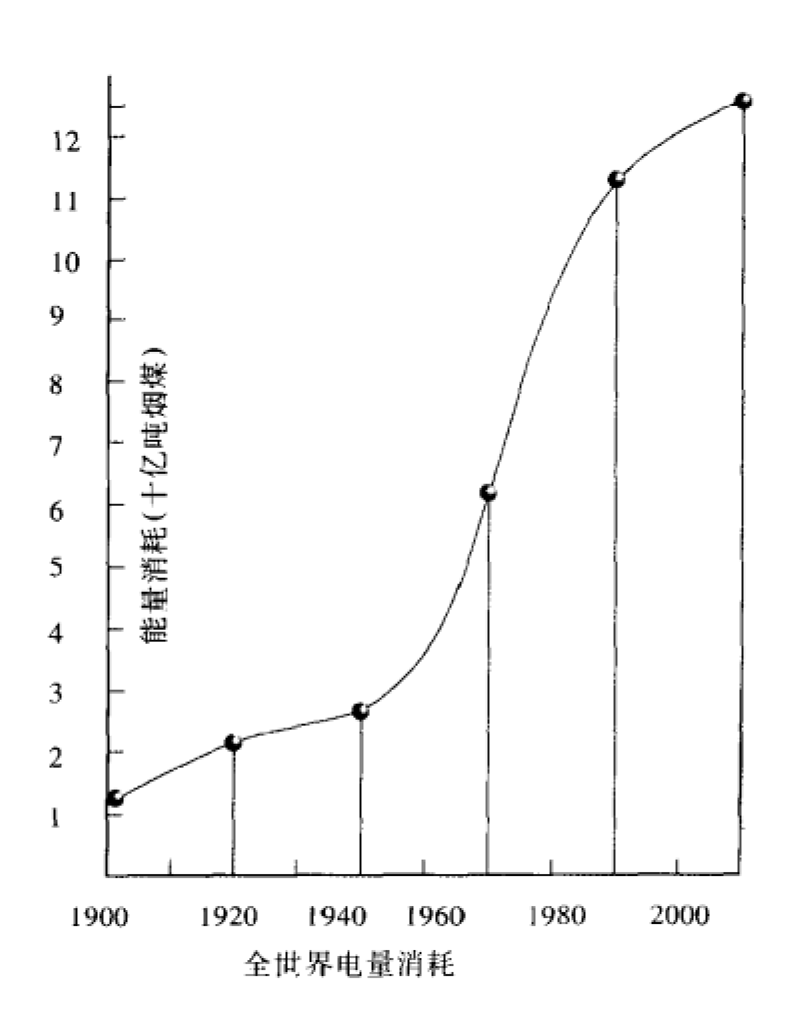


《星际航行》的一个镜头，牛顿、爱因斯坦、达他舰长和我本人在玩扑克。

因为《星际航行》是未来的安全而舒适的幻影，所以广受欢迎。我自己也算是一名《星际航行》迷，这样便很容易被说服去客串了一集。在那一集中我和牛顿、爱因斯坦以及达他舰长玩扑克，我把他们全打败了。可惜警报出现，所以我从未收到我的赢钱。

《星际航行》展现了一个在科学、技术和政治组织远比我们先进的社会（最后一点也许并不困难）。在现时和那时之间一定会有巨大的改变以及与之相伴随的紧张和混乱，但是在剧中描述的时期，科学、技术和社会组织据说已达到几乎完美的水平。

我想质疑是这种场景并诘问，我们是否会在科学和技术上达到一种最终的稳定的状态。从上一次冰河时期迄今的大约一万年左右人类知识和技术一直在演化着。也出现过一些挫折，例如在罗马帝国崩溃之后的黑暗时代。但是世界人口，作为我们维持生命和养活自己的技术能力的测度一直在稳步上升，除了一些诸如黑死病的小起伏(图6.1)。



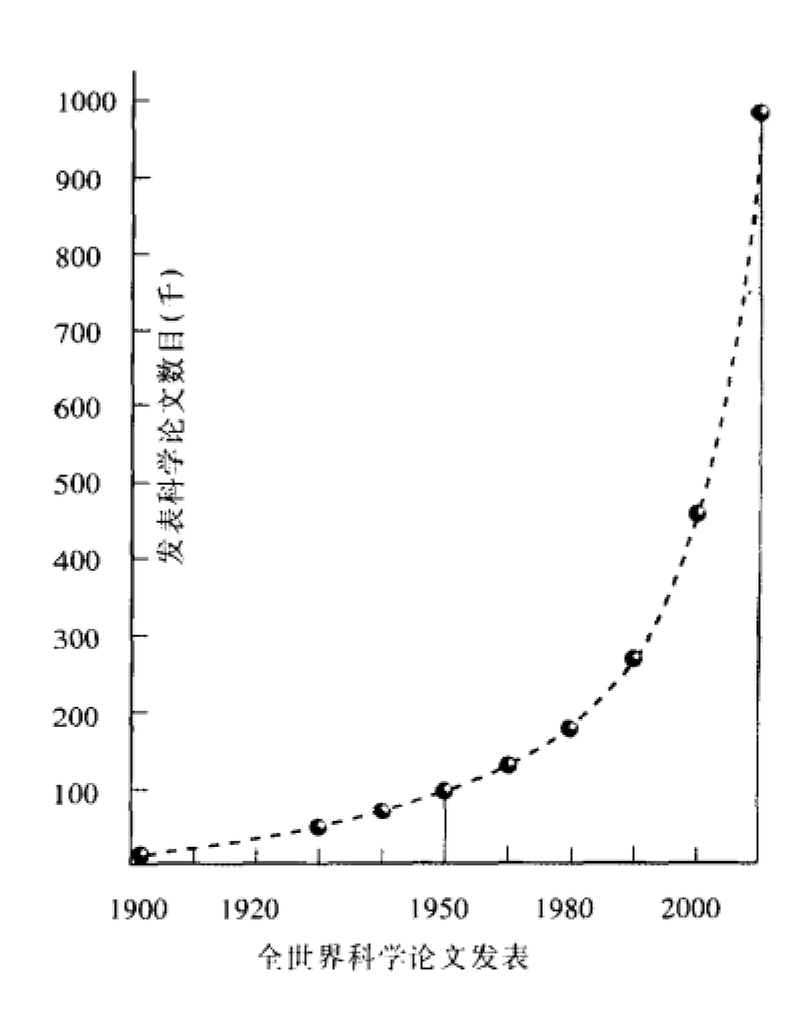


图 6.2

左图：全世界能量消耗，以10亿吨烟煤为计量单位，1吨烟煤的燃烧值相当于8.13百万瓦小时。

右图：每年发表的科学论文数。垂线的单位是千。1900年为9 000。1950年为90 000而2000年为900 000。

在前两个世纪，它的增长变成指数式的，也就是说每年的人口增加同样的百分比。这个增长率现在大约为每年百分之一点九。听起来这似乎不很多，但是它意味着每世界人口40年要加一倍(图6.2)。

电力消耗和科学论文的数目是近代技术发展的另外的测度。它们也是指数增长的，并在短于四十年间加倍。没有任何迹象表明，在最近的将来科学技术的发展会缓慢下来甚至停止——直至《星际航行》时代这肯定不会发生。这个时代被认为在不那么遥远的将来。但是如果人口增长和电力消耗增加继续现在的速率，世界人口到2600年将会到达擦肩摩踵的程度，到那时地球会因大量使用电力而发出红热的光芒(见右边插图)。





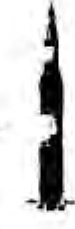
地球人口在2600年将会到达擦肩摩踵的程度，到那时地球会因使用电力而发出红热的光芒。

如果你把正在出版的所有新书一本本地堆放，你必须至少以每小时90英里（1英里=1.609公里）的速度运动才能追赶上它的尽头。当然，到了2600年新的艺术和科学著作将以电子形式出版，而不用形体的书报。尽管如此，如果继续这种指数增长，在我的理论物理领域每秒钟就有十篇新论文，根本来不及阅读。

很清楚，目前的指数增长不可能无限继续下去。那么将会发生什么呢？一种可能性是我们被某些灾难，譬如核战争毁灭殆尽。有一个黑色幽默讲，我们之所以未被外星人接触，是因为当一种文明到达我们的发展水平时，就变得不稳定而且毁灭自身。然而，我是一名乐观主义者。我相信，人类到达今天这样的境界，事物变得这么有趣，绝非仅仅为了把自己毁灭。

图 6.3
《星际航行》是发生在《探险号》上的故事，这是个像上图的星际飞船，它能够以翘曲速度旅行，它比光速快多了。然而，如果时序防卫猜测是正确的话，我们就必须用火箭推进的空间飞船来探索星系，它比光旅行得更慢。

《星际航行》对未来的想象，也就是我们达到先进的但是本质上静态的水平，就我们对制约宇宙的基本定律的知识而言，是可以实现的。正如我将要在下一章中描述的，也许存在一个我们将会在不太遥远的未来发现的终极理论。如果这个终极理论存在的话，它将要确定《星际航行》式的翘曲飞行能否实现。按照现在的观念、



我们必须以一种缓慢和冗长乏味的方式探索星系，利用运动得比光还慢的空间飞船；但是由于我们尚未拥有完整的统一理论，我们还不能完全排除翘曲飞行(图6.3)。

另一方面，我们已经知道在除了最极端情形外都成立的定律：制约《探险号》全体船员的定律，如果不包括制约空间飞船本身的话。但是我们在利用这些定律上或者利用它们所产生的系统的复杂性上，似乎永远不会达到一种恒定的状态。本章的其余部分正是讨论这种复杂性。

我们迄今为止所有的最复杂系统是我们自己的身体。生命似乎起源于太初海洋之中，太初海洋在40亿年前覆盖着地球。我们不知道这是怎么发生的。也许是原子间的随机碰撞构成了宏观分子，这些宏观分子能复制自己并且将自己聚集成更复杂的结构。我们能确切知道的是，到35亿年之前，高度复杂的DNA分子已经出现。



DNA是地球上所有生命的基础。它具有双螺旋结构，犹如螺旋状楼梯，它是在1953年于剑桥的卡文迪许实验室由弗朗西斯·克里克和詹姆·华特森发现的。双螺旋的两缕由核酸对连接，正如螺旋楼梯中的踏板。存在四种核酸：胞嘧啶、鸟嘌呤、酪氨酸和腺嘌呤。不同核酸沿着螺旋楼梯发生的顺序携带遗传信息，它使DNA分子在它周围集合有机体并复制自己。当DNA复制自身时，在核酸沿着螺旋的顺序会偶尔出错。在大多数情形下，复制的错误使DNA要么不能要么更少可能去复制自己，这意味着这种遗传误差或者它们被称作突变的会死去。但是在一些情形下，这误差或者突变将会增加DNA存活和繁殖的机会。遗传密码的这种改变是有利的。这就是包含在核酸序列中的信息逐渐演化并且变得更复杂的过程(见162页，图6.4)。

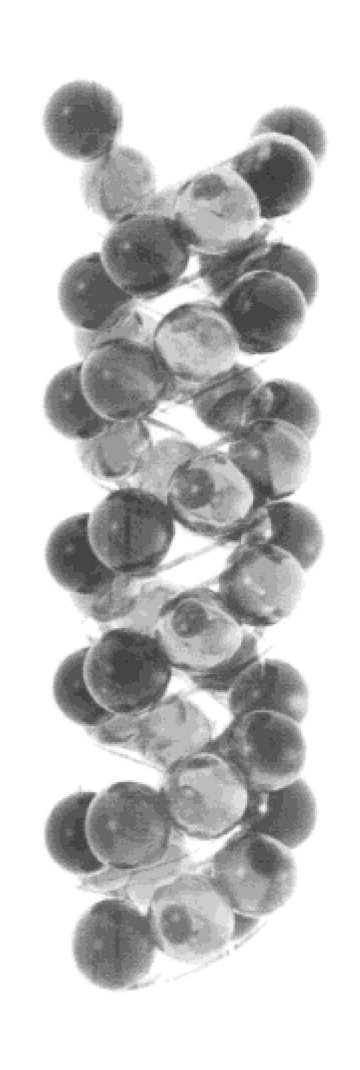


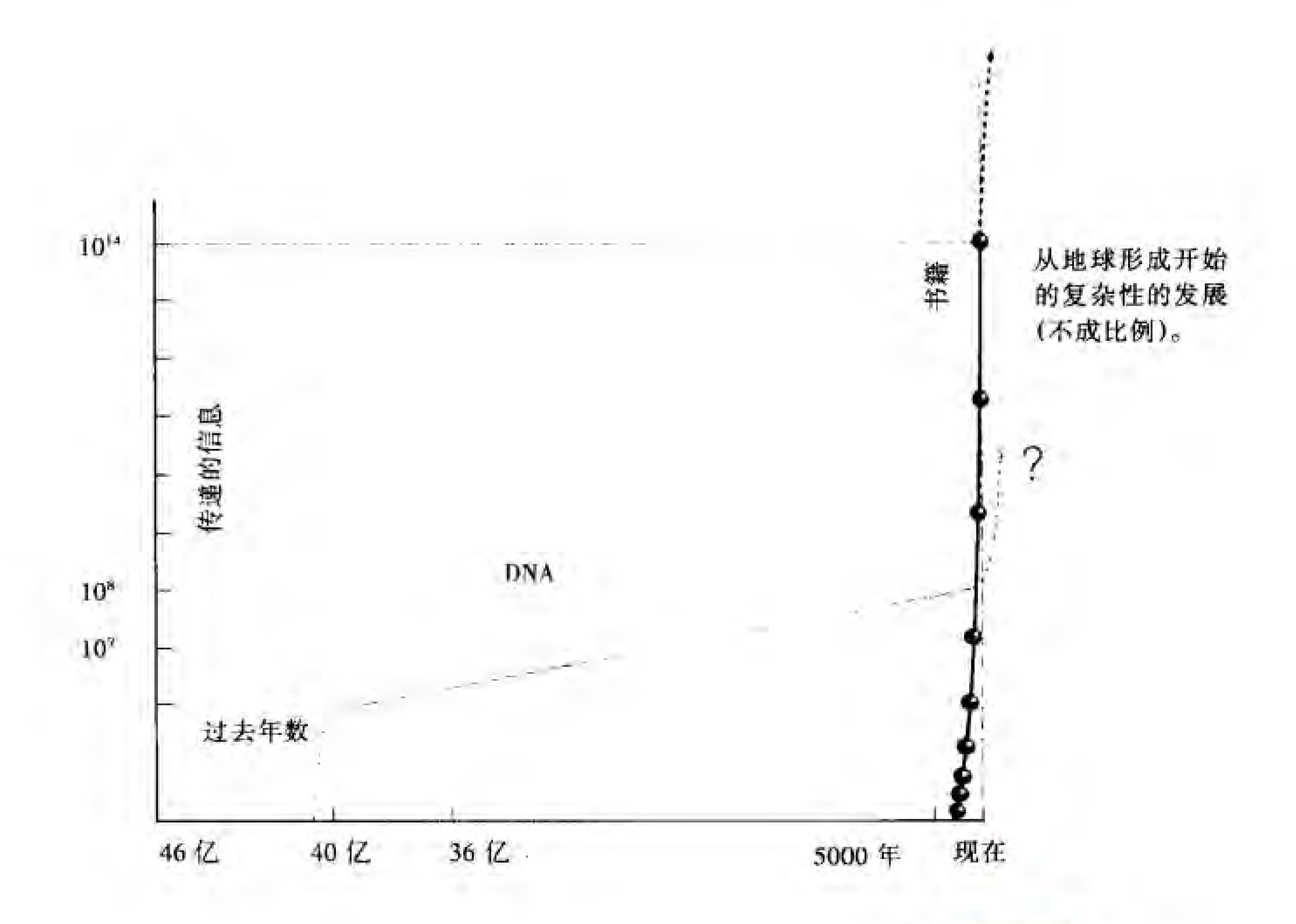
图 6.4　演化正在进行

右边的图是电脑生成的生物演化系列图，其演化程序是生物学家里查德·道金斯设计的。

特定种族的存活依赖某些诸如“有趣”、“不同”或“类似昆虫”的简单性质。

从一个单独像素开始，早先的随机生殖通过一个和自然选择类似的过程发展。道金斯令人印象深刻地只用 29 代就培育了类似昆虫的形式（伴随有许多演化死亡的结果）。





因为生物演化基本上是在所有遗传可能性空间中的随机漫游，所以它非常缓慢。其复杂性或者被编码于 DNA 中的信息的比特数粗略地为分子中的核酸数目。在最初的20亿年左右，其复杂性增加率应该是每百年一个比特信息的数量级。DNA 复杂性增加率在最近的几百万年里逐渐地上升到每年一比特左右。但是后来，大约6000至8000千年以前，发生了重大的新的进展。我们发展了书写语言。这意味着，信息从这一代向下一代转移，不必等待非常缓慢的随机突变和自然选择把它编码到 DNA 的序列的过程。复杂性的量被极大地增加。单独的一本浪漫小说就够储存关于猿和人类 DNA 差别的那么多



图6.5

在人体之外长大的胚胎可具有更大的大脑和智力。

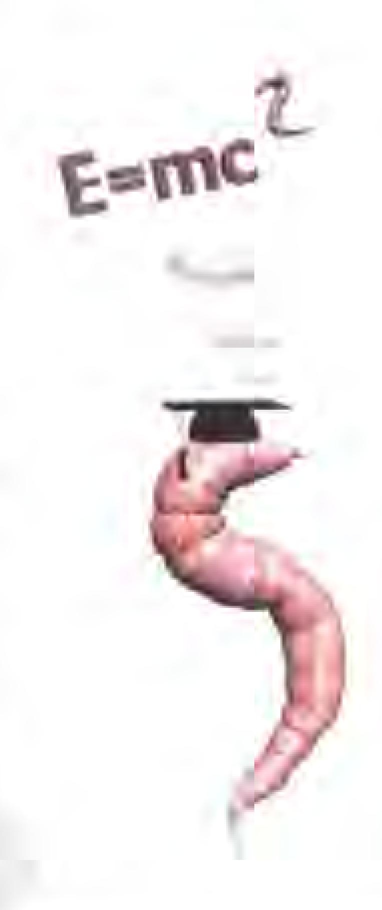


信息，而30卷百科全书可以描述人类DNA的整个序列(图6.5)。

更重要的是，书中的信息可以快速地更新。现在人类DNA由于生物进化引起的更新率大约为每年一比特。但是每年出版20万册新书，相当于新信息率超过每秒100万比特。当然，大部分信息都是垃圾。但是即使100万中只有一比特是有用的，那仍然比生物进化快10万倍。

这种通过外部的非生物手段的资讯传递使人类凌驾于世界之上并使人口指数地增长。但是我们现在处于新时代的启始，在这新时代里我们不需等待生物进化的缓慢步骤就能增加我们内部记录即DNA的复杂性。在最近的一万年中人类DNA上没有什么显著的改变，但是在以后的一千年我们很有可能将其完全重新设计。当然，许多人说人类遗传工程应该被禁止，但是我们能否防止它是很令人可疑的。为了经济的原因将允许植物和动物的遗传工程，而有些人一定会去对人类进行尝试。除非我们有一个极权的世界政府，某些人在某处将设计改良人种。

很清楚，创造改良的人种相对于未改良的人种会产生巨大的社会和政治问题。我不想将人类遗传工程当作必须的发展来辩护，我只不过是说，不管我们要不要，它都可能发生。这就是为什么我不相信《星际航行》那样的科学幻想，在那里四百年后的未来人们和我们今天本质上是相同的。我认为人种及其DNA将相当快速地增加其复杂性。我们应该认识到这很可能发生，而且考虑如何去应付这种局面。



在现时卑微的蚯蚓大脑的计算能力仍然超过我们的电脑。

如果人类要去应付它周围日益复杂的世界和遭遇到诸如太空旅行这样的新挑战的话，它必须改善其精神与体魄。如果生物系统总想领先电子系统的话，人类也需要



图 6.6

Intel: 3,500
Intel **8080**: 6,000
Intel **8086**: 29,000
Intel **80286**: 134,000
Intel **80386**: 275,000
Intel **80486**: 1,200,000
Intel **Pentium**: 5,500,000
Intel **Pentium Ⅱ: 7,500,000**
Intel **Pentium Ⅲ**: 9,500,000
Intel **PentiumⅣ**: 28,000,000

1972 1974 1982 2000 1985 1989 1993 1995 1999 2000

从 1972 年开始到一个 CPU 制造商保守估计的 2007 年的计算的指数增长。在每一个实际晶片后的数字给出了每秒计算的次数。

Intel **PentiumⅣ**: 28,000,000
Intel **PentiumⅣ**: 42,000,000
Intel: 84,000,000
Intel: 200,000,000
Inte **l10GHz**: 28,000,000

2000 2001 2003 2005 2007





神经的植入将会加强记忆，而且诸如整个一种语言或者这本书的内容可在几分钟内学会。这样加强的人类和我们自己极不相似。

增加自己的复杂性。电脑在现时具有速度的优势，但是它们毫无智慧的迹象。这并不奇怪，因为我们现有的电脑比一根蚯蚓的大脑还简单。蚯蚓是一种智力微不足道的物种。

但是，计算机服从所谓的穆尔定律：它们的速度和复杂性每 18 个月增加一倍（图 6.6）。它是那些显然不能无限继续的指数增长之一。然而，它也许会继续到电脑具有类似于人脑的复杂性为止。某些人说计算机永远不能显示真正的智慧，不管这智慧是指何而言。但是我似乎觉得，如果非常复杂的化学分子能在人体运行使他们具有智慧，那么同等复杂的电子线路也能使电脑以一种智慧的方式行为。而且如果它们是智慧的，它们也应该能设计出甚至具有更大的复杂性和智慧的电脑。

生物和电子复杂性的这种增加会永远继续下去吗？还是存在一个自然的极限？在生物方面，迄今的人类智慧的极限被通过产道的大脑尺度所定。我目睹我三位孩子的出世，知道让头出来是如何困难。但是，我预料在一百

宇宙的简史

事件(不成比例)

0.0003亿年
大爆炸以及燃烧的、光密的暴胀宇宙

物质/能量退耦合，宇宙是透明的。

10亿年：
物质成团，形成元星系，合成重核

30亿年：
哈勃空间望远镜在其深场探测中记录的星系。

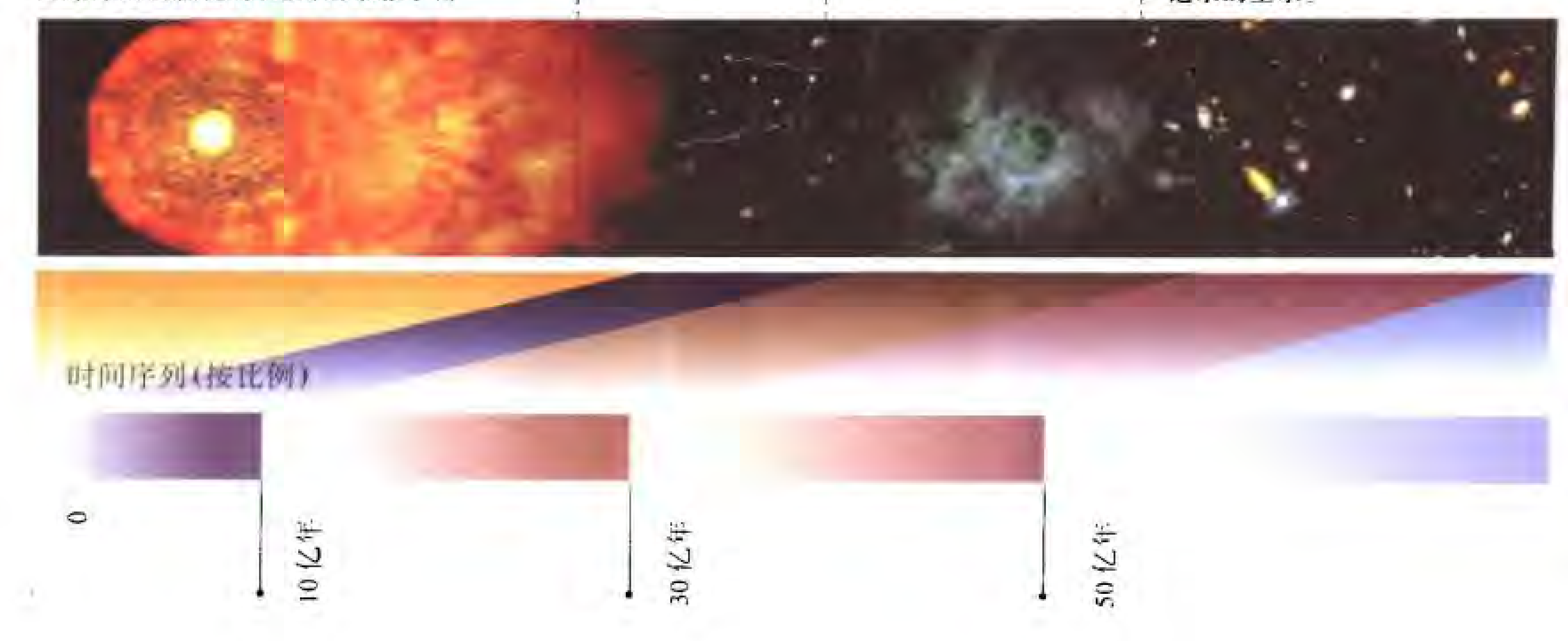


图6.7
人类的存在只占宇宙历史极微小的部分。(如果这张图是按比例的，而人类存在的长度7厘米，那么宇宙的整个历史超过1公里。)我们遭遇的任何外星生命很可能比我们更低级得多或者更先进得多

年内，我们将能够在人体之外养育婴儿，这样这个极限就被消除了。然而，通过遗传工程增加人脑尺度最终会遭遇到这样的问题，即身体中负责我们精神活动信息的化学信使运动较慢。这意味着，进一步提高大脑的复杂性将会以速度为代价。我们可能才思敏捷或者非常智慧，但是二者不可得兼。我仍然认为，我们可以比《星际航行》中的大部分人有智慧得多，那不是什么困难的事。

电子线路具有和人脑一样的复杂性对速度的问题。然而，在这种情形下讯号是电子的，而不是化学的，它以光速运动，速度快多了。尽管如此，光速已经是设计更快速电脑的实际极限。人们可以进一步降低线路尺度以改善这种局面，但最终将有一个由物质原子性质设下

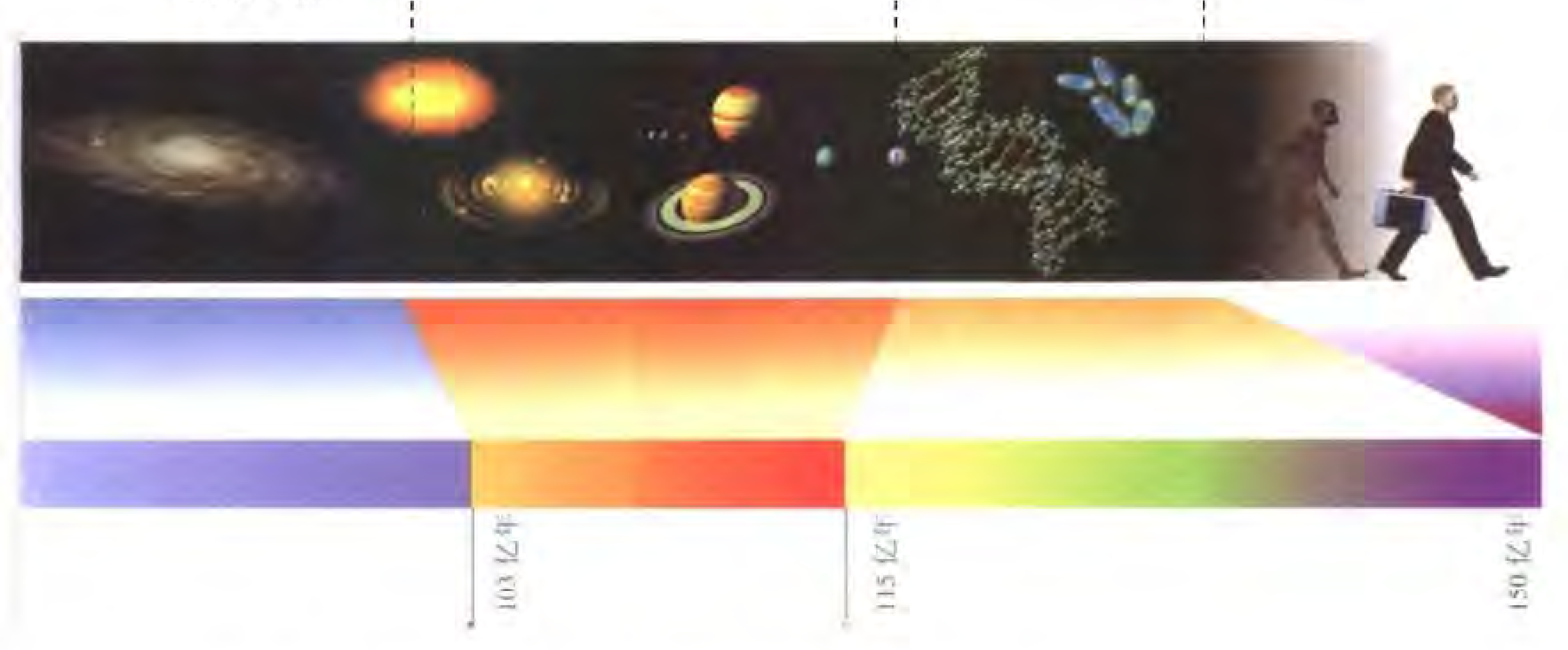


形成新的像我们自身的那样具有重核的星系。

形成我们太阳系以及公转的行星。

35 亿年以前生命形式开始出现。

50 万年前早期人类出现。



的极限。我们在遇到这个障碍之前仍有一段路可走。

电子线路在保持速度之际增加其复杂性的另一种方法是去复制人脑。大脑不具备单独的 CPU—中央处理器—它顺序处理每一个指令。相反地，人脑有几百万个同时一道工作的处理器。这种大规模平行处理也将是电子智慧的未来。



假定我们在以后的一百年不自身毁灭，我们将很可能首先分散到太阳系的行星去，然后再到邻近的恒星去。但是不会像在《星际航行》或《巴比伦 5 号》中那样，在几乎每一个恒星系统都有接近人类的新种族。我们人种以它目前的形式仅仅存在了从大爆炸以来的一百五十亿年左右中的二百万年(图 6.7)。



生物－电子接合

在二十年之内一台值1000美元的计算机就会和人脑一样复杂。平行处理器可以模仿我们大脑工作的方式，并且使计算机以智慧的有意识的方式行为。

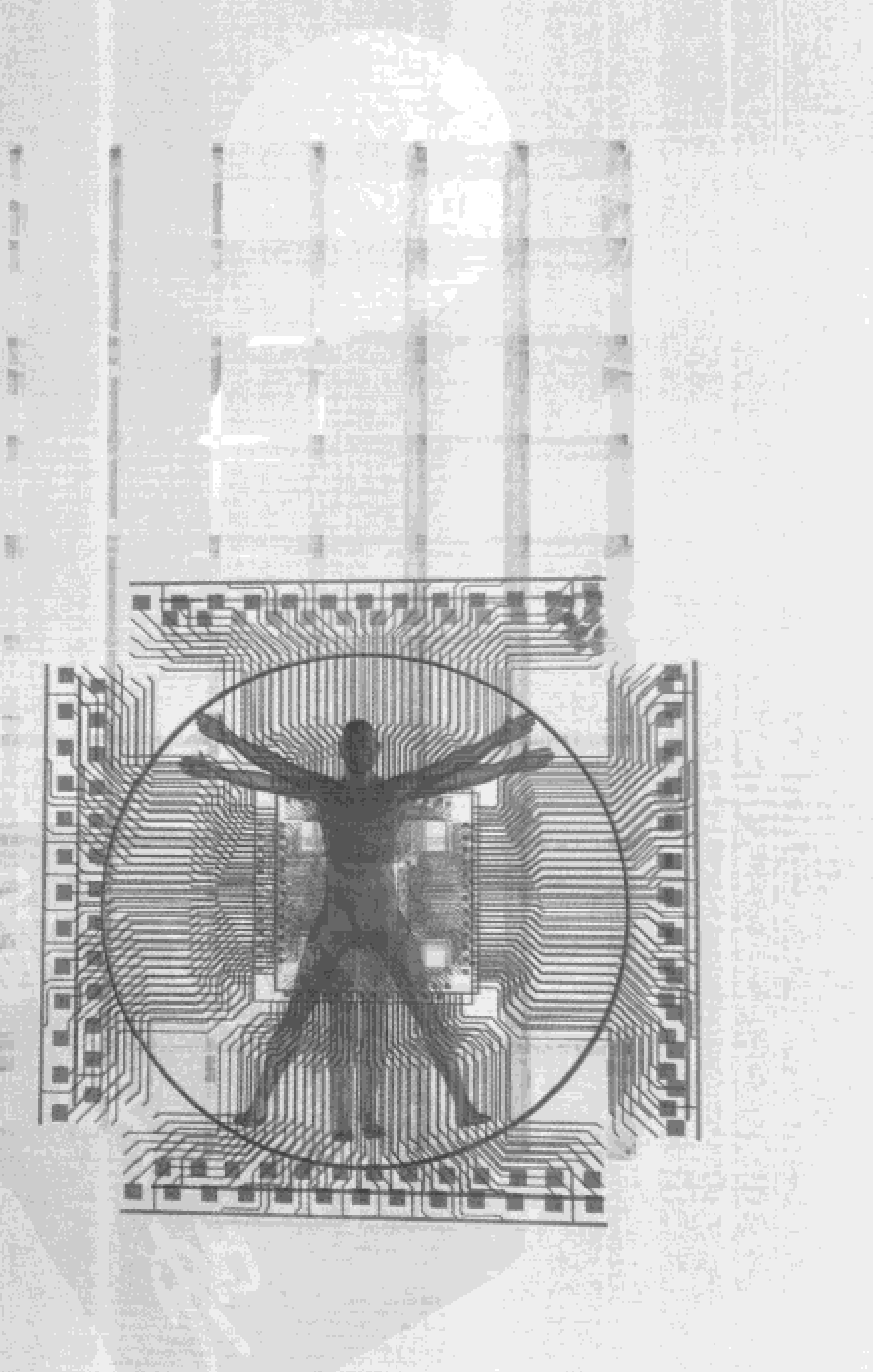
神经的植入可以允许大脑和电脑之间的更快速得多的接合，化解了生物和电子智慧之间的距离。

在最近的将来，大多数商业交易很可能是在网人之间通过万维网来进行。

在十年之内，我们中的许多人甚至选择一种在网上的虚拟存在的生活，形成网上友谊和关系。

我们对人类基因的理解无疑将大大推进医学，但是它也将使我们去明显地增加人类DNA结构的复杂性。在以后的几百年间，人类遗传工程会取代生物进化，重新设计人种并且提出崭新的道德问题。

到我们太阳系以外进行空间旅行很可能需要遗传工程过的人类或者无人的计算机控制的探测飞船。





这样，即使生命在其他恒星系统发展，在其可以认出的人类阶段邂逅它的机会非常渺茫。我们将遭遇到的外星人的生命很可能要么更为原始得多，要么更为先进得多。如果它更先进，为何不分散到整个星系并且造访地球呢？如果外星人曾经来过，它必须是显而易见的：与其像影片《外星人》不如说更像影片《独立日》。

那么，如何解释我们没有地球外的来客呢？可能是在那里存在有先进的种族，它知悉我们的存在，但是让我们在低水平上自作自受。然而，如此照应低等的生命形式是令人可疑的：我们中的大多数人忧虑过在脚下被踩死多少昆虫或者蚯蚓吗？更合理的解释应该是，在其他行星上不管是生命的发展还是生命发展智慧的概率都非常小。因为我们宣称自己是智慧的，尽管也许没有什么根据，我们倾向于把智慧看成进化的不可避免的后果。然而，人们可以对此置疑。不清楚智慧是否具有更多的存活价值。细菌虽然没有智慧，但是存活得很好。如果我们所谓的智慧在一场核战争中毁灭自身的话，细菌仍然存活。这样在我们探索星系之际，我们也许发现初级生命，但是我们不太可能找到象我们的生物。



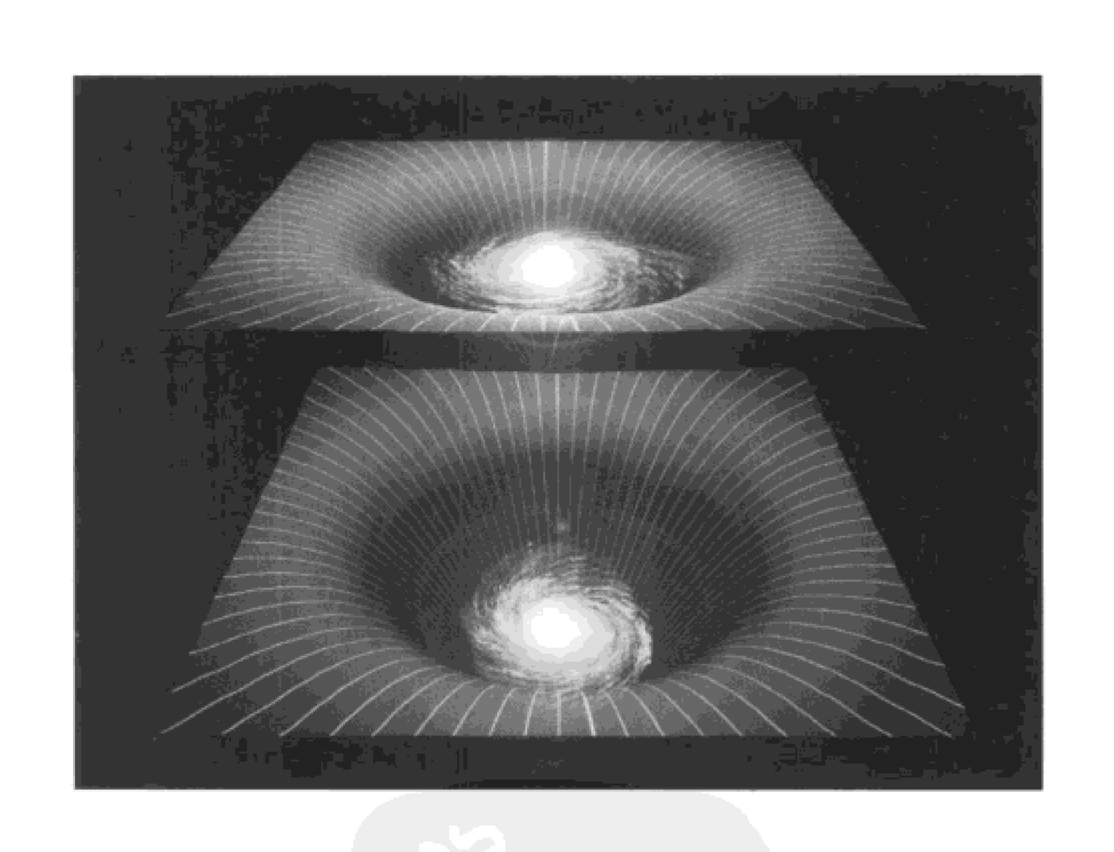
智慧具有许多长期存活的价值吗？

科学的未来不会像在《星际航行》中描述的那么令人宽慰的图景：一个充满了许多有人类特征的种族的，具有先进的但本质上静止的科学技术的宇宙。相反地，我认为我们将独自地但是快速地发展生物和电子的复杂性。在以后的一百年间这方面的发展不会太多，这就是我们所能可靠预言的一切。但是，如果我们能够存活到一个千年之末，那时候我们和《星际航行》的差别将会是根本的。



第七章
膜的新奇世界

我们生活在一张膜上，或者我们只不过是张全息图？



这里是龙

图 7.1
M－理论像一个拼图玩具。容易辨认围绕着拼图边缘的小片并将其嵌在一起，但是我们对在中央会发生什么知道很少，在那里我们不能作某些量是很小的近似。

我们的发现旅程在将来会走向何方呢?我们在寻找制约宇宙和其中一切的完整统一理论上能取得成功吗?事实上，正如在第二章中描述过的，我们也许已把万物理论认同于 M－理论。尽我们所知，这种理论不拥有单独的表述。相反地，我们发现了一个表观上不同的理论的网络，所有这些理论似乎是同样的内在的基本理论在不同极限下的近似，正如牛顿引力论在弱引力场的极限是爱因斯坦广义相对论的一种近似。M－理论像是拼图玩具：最容易辨认围绕着拼图边缘的小片并将其嵌在一起，这正是 M－理论中某些量很小的极限。我们现在对这些边缘了解得相当好，但是在 M－理论拼图的中央仍有缝隙的空洞，我们不知道在空洞处究竟怎么回事(图 7.1)。在我们没有把这空洞填满之前，实在不能宣称已经找到了万物理论。



11－维超引力

在 M－理论的中心是什么呢?我们将会像在那些未探险的土地的老地图上一样发现龙(或者某些同样奇怪的东西)吗?

我们过去的经验提示，只要我们将我们观测的范围延伸到更小尺度，我们就很可能发现意外的新现象。在 20 世纪初我们理解在经典物理尺度下的自然行为。经典物理在从上至恒星际距离下到大约百分之一毫米的范围内成立。经典物理假定，物体是具有诸如弹性和粘滞性性质的连续媒体。但是物体不是光滑而是颗粒性的证据开始出现：物体是由微小的称作原子的构件组成的。原子这个词源自希腊，意为“不可分的”，但是人们发现原子不是不可分的；它们包含着围绕由质子和中子构成的核公转的电子(图 7.2)。



图 7.2
右图：经典不可分原子。
最右图：在一个原子中电子围绕着质子和中子组成的核公转。





图 7.3
上图：一个质子由两个具有正的三分之二电荷的上夸克和一个具有负的三分之一电荷的下夸克组成。
下图：一个中子由两个具有负的三分之一电荷的下夸克和一个具有正的三分之二电荷的上夸克组成。

20 世纪的最初 30 年原子物理的研究使我们理解小到百万分之一毫米的尺度。然后我们发现质子和中子由更小的称为夸克的粒子组成(图 7.3)。

我们当代关于核子和高能物理的研究又将我们带到比上述的还小十亿倍的尺度。我们似乎可以无限继续下去，发现在越来越小的尺度下的结构。然而，这个序列存在一个极限，如同俄罗斯套娃，一个娃娃内部套有更小的娃娃(图 7.4)。

最终，人们达到最小的娃娃，它再也不能被拆开了。物理学中最小的娃娃是所谓的普朗克长度。为了探测更短的距离需要这么高能的粒子，这些粒子处于黑洞之中。我们不能准确知道 M－理论中的基本普朗克长度是多少，但是它可能小到一毫米除以一亿亿亿亿。我们不准备建造一个可探测那么小距离的粒子加速器。该加速器将会比太阳系还要大，这种规划在当前的财政气候下多半多半不会得到批准(图 7.5)。

然而，有了一个激动人心的新进展，表明我们更容易(也更便宜)地至少发现 M－理论中的某些龙。正如在第二章和第三章中解释的，在数学模型的 M－理论网络



经典物理

核物理

原子物理

大统一理论

普朗克尺度物理: M－理论?

0.0000000000000000000000000000000001616 mm

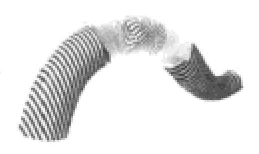
图 7.4　每个娃娃代表对自然的小到某一尺度的理论理解。每个娃娃都包含一个更小的娃娃，后者对应于描述在更短的尺度下自然的理论。但是在物理学中存在一个最小基本长度，即普朗克长度，这是自然可以用 M－理论描述的尺度。

图 7.5
需要用于探测普朗克长度那么小的距离的加速器的迟度会比太阳系直径还要大。

中，时空具有十或十一维。人们直到最近还认为六个或七个额外维全都被卷曲得非常微小。它们就像人的头发（图 7.6）。

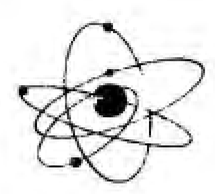
如果你透过放大镜来看头发，你能看到它的粗细，但就用肉眼就只能看到一根线，只有长度没有其他维。时空可能是类似的，它在人体、原子甚至核物理的尺度下显得是四维的并且几乎平坦。另一方面，如果我们用极高能粒子探测非常短的距离，我们应该看到时空是十维或者十一维的。

如果所有附加的维都非常小，观察到它们则是非常困难的。然而，最近有人提议一个或者更多的额外维也许



当探测器具有足够高的能量时，它们便能够揭示时空是多维的。

图 7.6
一根头发被肉眼看起来像是一根线；它仅有的维呈现为长度。类似地时空让我们看起来显得是四维的，但是当用非常高能的粒子去探测时，就呈现为十维或十一维的。



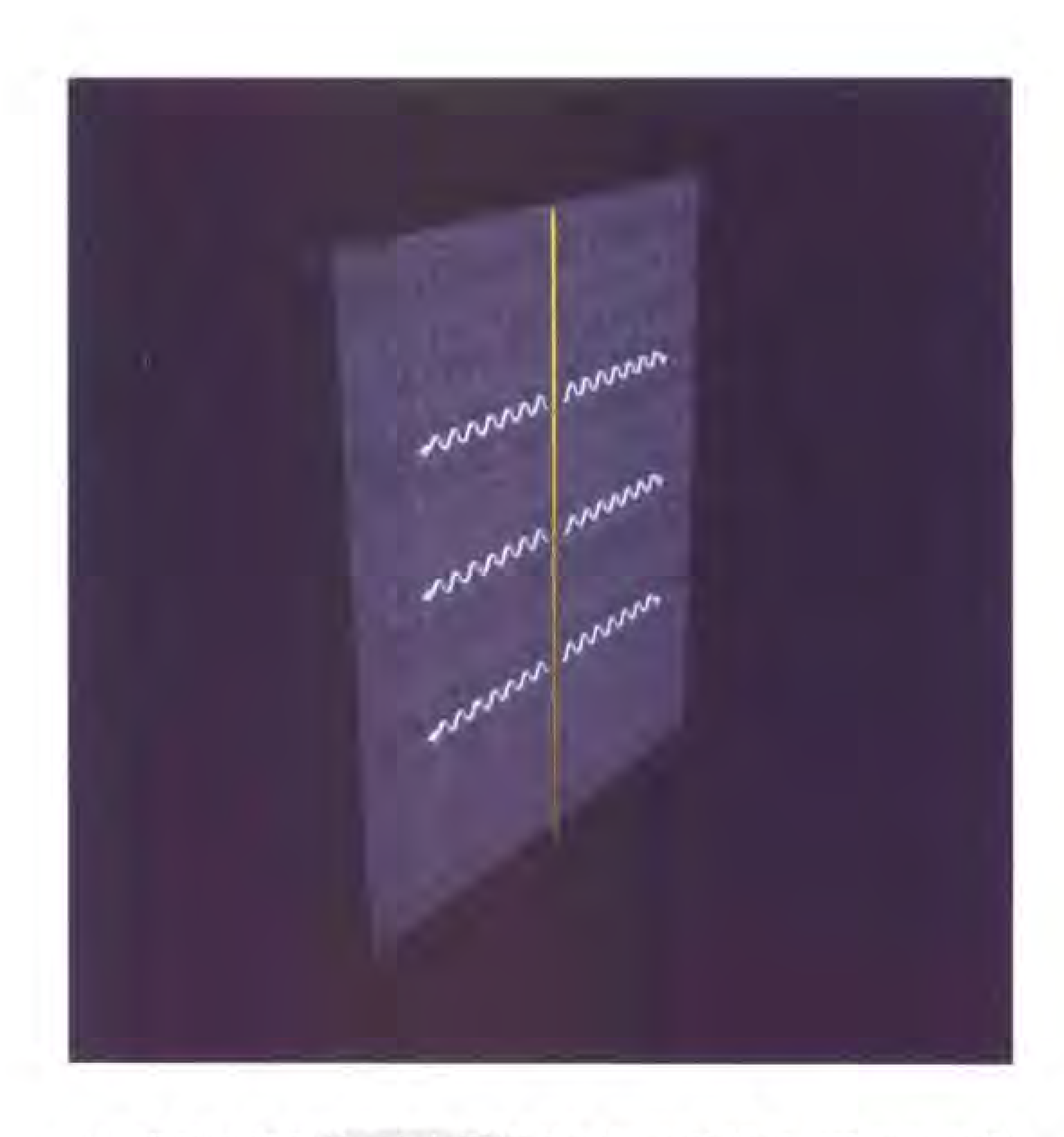


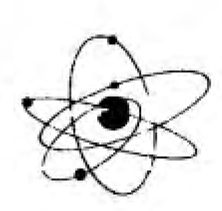
图 7.7 膜世界

电力被局限于膜上而且减小的速率刚好让电子具有围绕原子核公转的稳定轨道。

大，甚至是无限的。这个思想具有巨大的优势（至少对于像我这样的实证主义者而言），下一代粒子加速器或者引力的短距离的敏感测量也许可以检验这种思想。这类观测要么可以证伪此理论，要么在实验上证实了其他维的存在。

大的额外维是在我们寻求终极模型或者理论中的激动人心的新进展。它们意味着我们生活在一个膜世界中，一个在高维时空中的四维面或膜。

物质或者像电力这样非引力的力将会被限制在膜上。这样，任何不涉及引力的东西的行为就和在四维中一样。尤其是，一个原子的核和围绕它公转的电子之间的电力随



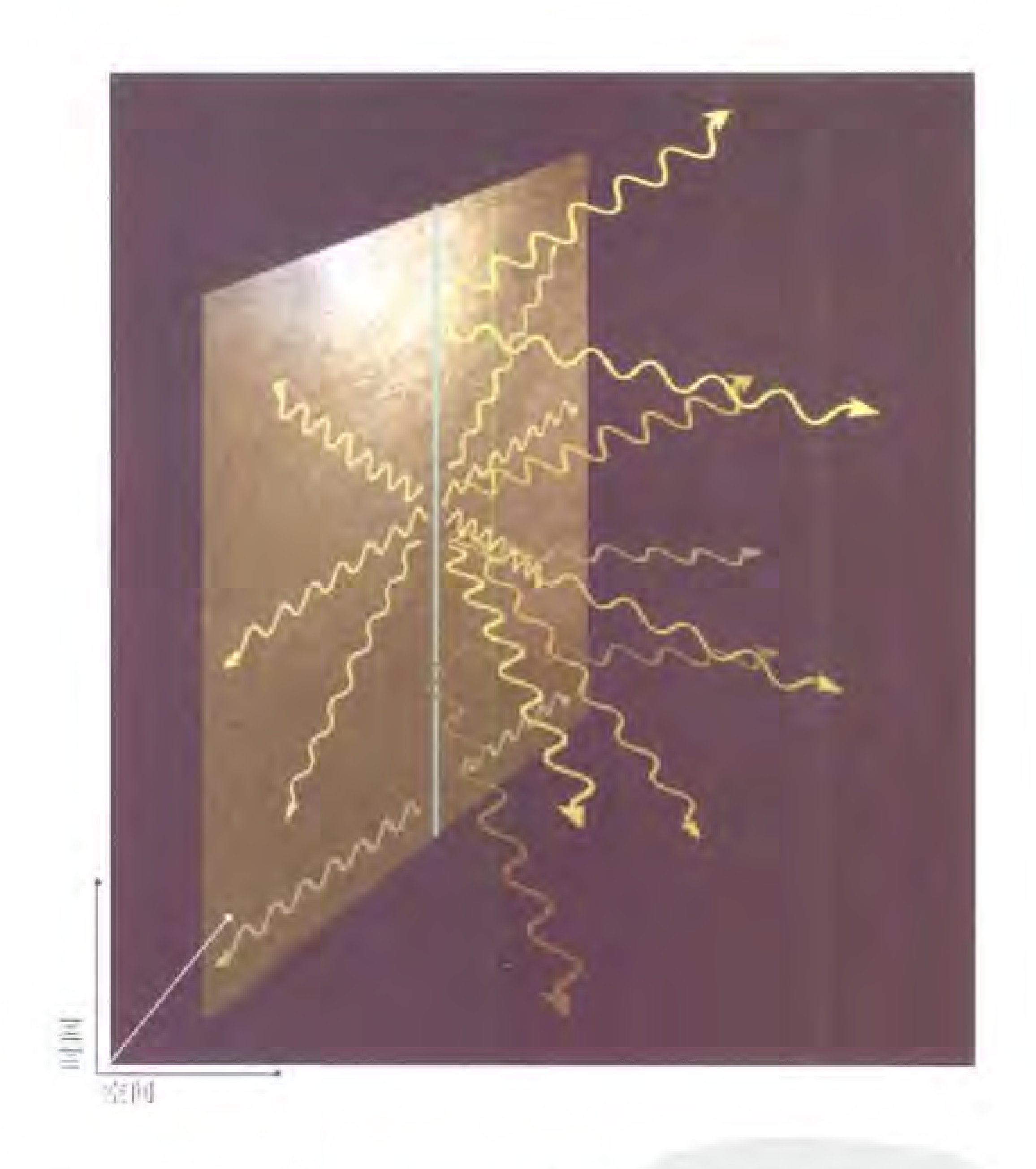


图 7.8
引力不但发散到额外的维中，也沿着膜传递作用，而它随距离衰减得比在四维时更快。

距离减小，其下降率刚好使原子稳定，电子不会落入核中(图7.7)。

这就和人择原理相一致。人择原理陈述道：宇宙必须适合于智慧生命：如果原子不稳定，我们便不能在此观察宇宙并诘问为何它显得是四维的。

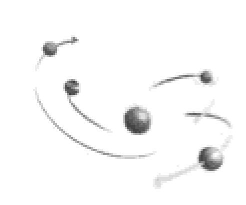
另一方面，弯曲空间所代表的引力会弥漫到高维时空的整体中去。这意味着引力的行为和我们体验的其他力不同：因为引力发散到额外维去，它随距离减小得比我们预料得更快(图 7.8)。

图 7.9
引力在大距离下更快的衰减意味着行星轨道是不稳定的。行星要么落进太阳(**a**)、要么完全逃离它的吸引(**b**)。

如果引力更快速的减小可以延伸到天文的距离,我们就会在行星轨道上已经觉察到它的效应。事实上,正如在第三章中谈论到的,这些轨道会是不稳定的:行星要么会掉到太阳中去,要么逃逸到寒冷黑暗的星际空间中去(图7.9)。

然而,如果该额外维在离我们生活其上的膜不远的另一张膜处终结的话,这就不会发生。那么,对于超过两张膜相分离的距离,引力正如电力那样,不能自由地发散开去,而被有效地局限在膜的上,并且减小的速率刚好适合于行星轨道(图 7.10)。

另一方面,在距离短于膜之间的分离,引力会下降得更快速。在实验室中已经精确地测量到重物体之间的非



额外维

图 7.10　邻近我们膜世界的第二张膜会防止引力向额外维的远方发散，而且意味着在比膜分离更大的距离上，引力衰减的速率和人们在四维情形下预想的一样。





图 7.11　卡文迪许实验

一束激光 (e) 被投射到刻度的屏幕 (f) 上确定哑铃的任何扭转。两个小铅球 (a) 附在哑铃 (b) 上，哑铃上带有一面小镜子 (c)，这些都自由地悬挂在扭矩纤维上。

在旋转的杆上的两个大铅球(g)放置在小铅球附近。当大铅球旋转到相反位置，哑铃振动，然后在一个新位置安定下来。

常小的万有引力，但是迄今实验仍然还没有探测出当膜的分离小于几毫米它的效应。现在正进行在更短距离下的新的测量(图 7.11)。

在这个膜世界中，我们生活在一张膜上，但是在邻近还有另一张“影子”膜。因为光被限制于膜上，而不能通过它们之间的空间传播，所以我们不能看到影子世界。但是我们会感觉到影子膜上的物质的引力影响。这种引力在我们的膜上会显得是由真正“暗的”源产生的，我们能够检测它们的仅有办法是通过它们的引力(图 7.12)。事实

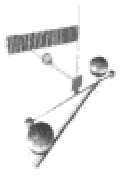


图 7.12　在膜世界场景中，由于引力传播入额外的维，行星可以围绕在影子膜上的暗质量公转。

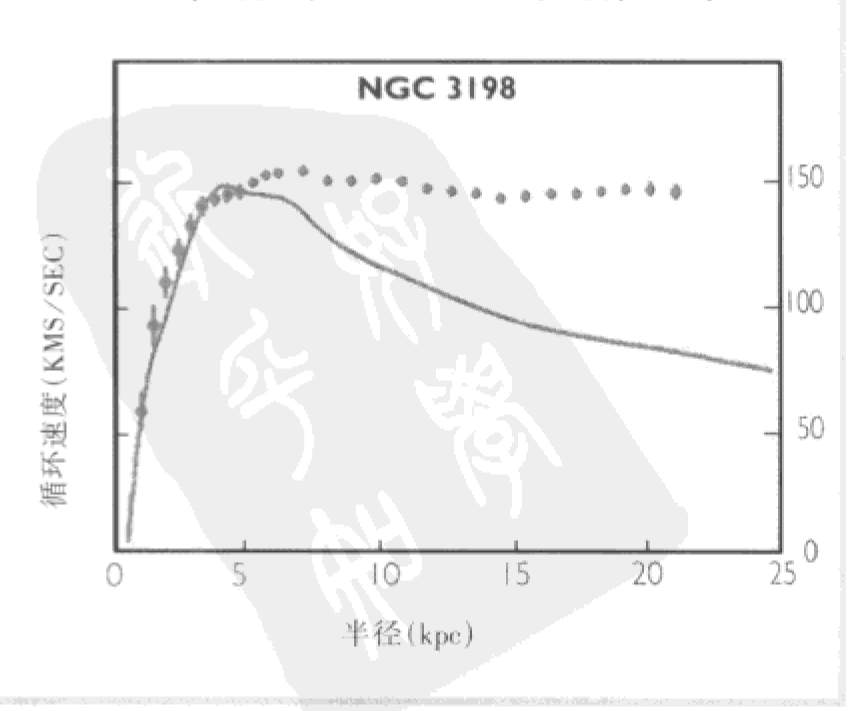


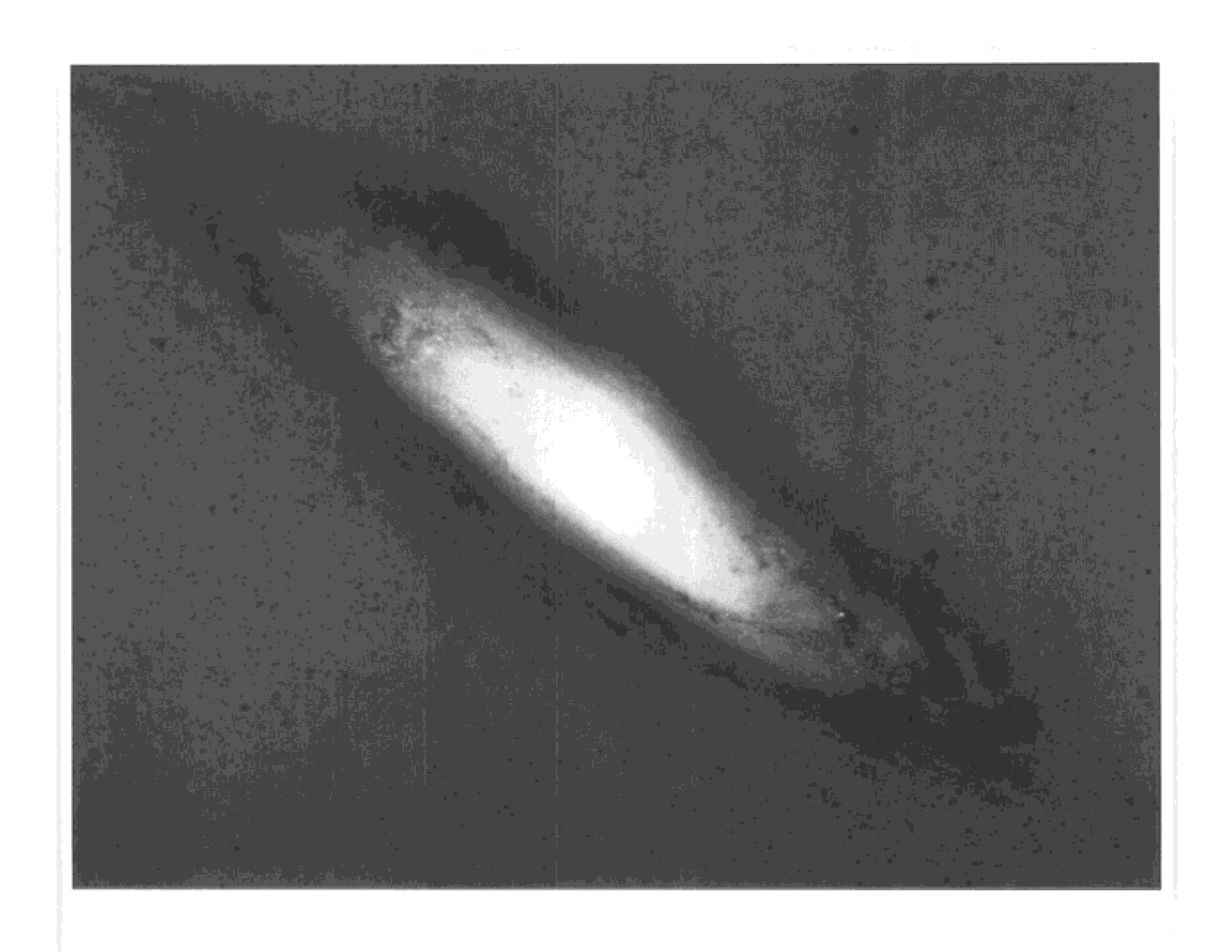
暗物质的证据

各种宇宙学视测强烈地暗示，在我们的星系和其他星系中必须存在比我们看到的更多得多的物质。这些现像中最令人信服的是，在象我们自身的银河系的螺旋星系以外的恒星公转的速度太快了，以至单凭我们观察到的所有恒星的引力吸引不足以把它抓在轨道上(见对面图)。

从1970年代开始我们知道，在螺旋星系的外面区域观察到的恒星旋转速度(由图中的点标明)和从星系的可见恒星分布按牛顿定理预见的公转速度(如图中的曲线标明)之间存在偏差。这个偏差表明，在螺旋星系的外部必须存在更多得多的物质。

螺旋星系NGC3198的旋转曲线





暗物质的性质

现在宇宙学家相信，螺旋星系的中心部分主要由通常的恒星组成，它们的外围由我们不能直接看到的暗物质主导。但是，现在的一个基本问题是去发现在星系的这些外围的暗物质的主导形式的性质。在1980年之前，人们通常假定这种暗物质是由质子、中子和电子组成的平常物质，它们处于某种不易检测的形式：也许是气体云，或者MACHO—“重质量的紧致的晕状物体”，譬如白矮星或者中子星，甚至黑洞。

然而，星系形成的现代研究使宇宙学家们相信，暗物质中的可观的部分必须具有和平常物质不同的形式。也许它是由诸如轴子或者中微子之类的非常轻的基本粒子的质量引起的。它甚至可由更奇异的粒子种类，例如WIMP—“弱相互作用重质量粒子”构成。现代基本粒子理论预言WIMP，但它们还没被实验检测到。

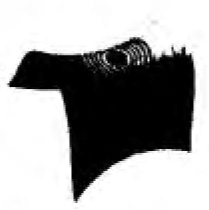


位于膜之间的额外维的无人国

图 7.13
因为光不能通过额外维传播，但是引力可以，所以我们看不见影子膜上的影子星系。这样，暗物质，即我们不能看见的物质影响我们星系的旋转。

上，为了解释恒星绕着我们星系中心公转的速度，似乎必须存在比我们观察到的物质更多的质量。

这种下落不明物质也许是在我们世界中某些奇异的粒子种类，诸如 WIMP(弱相互作用重粒子)或者轴子(非常轻的基本粒子)。但是，下落不明质量也可以是影子世界以及其中的物质存在的证据。也许它包含影子人类。他们在努力解释影子恒星围绕着影子星系中心公转时，极想



我们膜世界
的单独的线

知道在他们世界中似乎下落不明的物质(图 7. 13)。

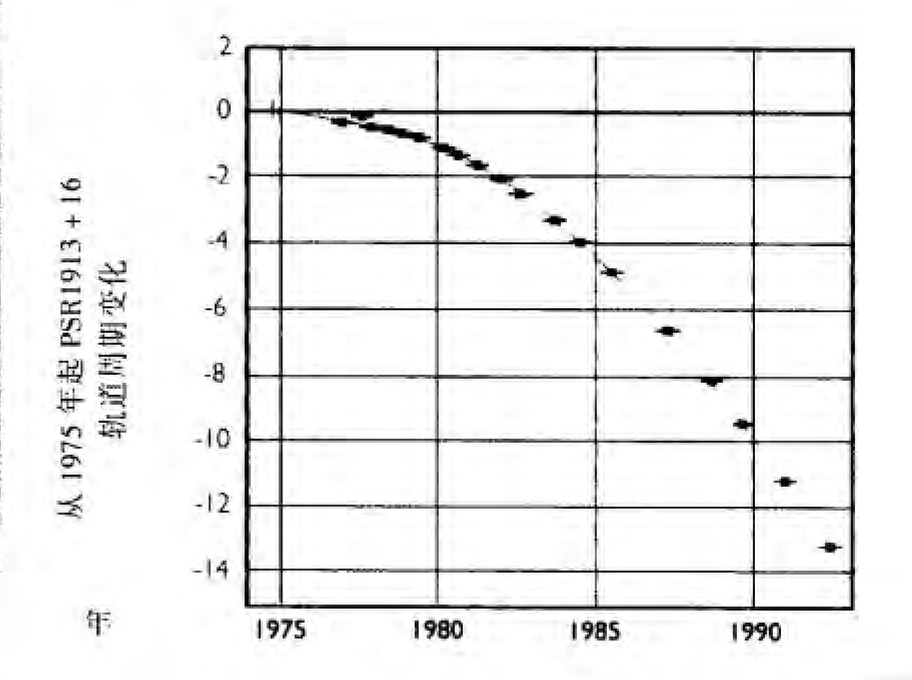
如果额外维不在第二张膜上终结，另一种可能性是它们是无限的，但是高度弯曲的，正如一个马鞍面（图 7. 14)。丽莎·朗达尔和拉曼·桑德鲁姆指出，这类曲率的行为和第二张膜相当像：一个物体在膜上的引力影响被局限在膜的小邻域中，而且不会发散到额外维的无穷去。正如在影子膜模型中那样,引力场在长距离下的下降可以刚好解释行星公转和在实验室中的引力的测量，但是引力在短距离下变化得更厉害。

图 7. 14
在朗达尔－桑德鲁姆模型中只存在一片膜(在这里只画出一维)。额外维延伸到无穷,但是被弯曲得像一片马鞍面。这种曲率防止膜上物质的引力场发散到额外维的深处。

然而，在朗达尔－桑德鲁姆模型和影子膜模型之间存在一个重要的差别。在引力影响下运动的物体产生引



两个紧致的中子星向内相互涡旋

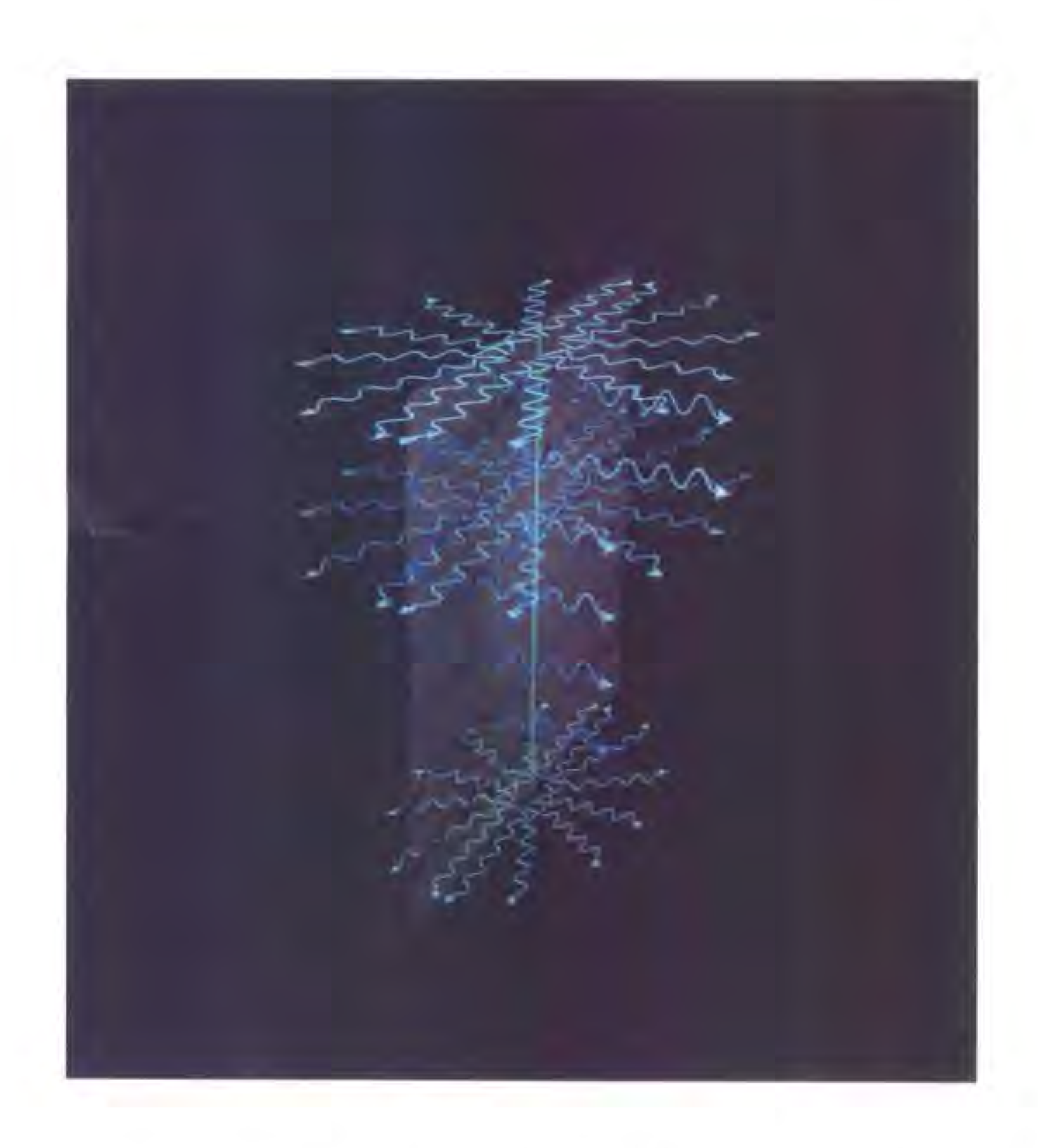


从 1975 年起双脉冲星 PSR1913 + 16 的图

双脉冲星

广义相对论预言，在引力影响下运动的重物发射引力波。引力波像光波一样，从发射它们的物体携带走能量。然而，通常能量损失的速率极低，因此观察它非常困难。例如，引力波发射使地球慢慢地向着太阳涡旋进去，但是它们还需要 10^{27} 年才能碰撞！

但是 1975 年罗素·荷尔西和约瑟夫·泰勒发现了双脉冲星 PSR1913 + 16，这是由两个紧致中子星组成的系统。它们相互公转，其最大的分离只有一个太阳半径。根据广义相对论，其快速运动意味着，因为这个系统发射强大的引力波信号，它的轨道周期应该在更短得多的时间尺度下减小。广义相对论预言的变化与荷尔西和泰勒对轨道参数的仔细观测极其完美地符合。他们的观测指出，从 1975 年以来周期的缩短超过了 10 秒。1993 年他们因为这个广义相对论的验证而被授予诺贝尔奖。



力波，即曲率的涟漪，它以光速在时空中传播。正如光的电磁波，引力波应携带能量，对双脉冲星 PSR1913 + 16 的观测已经证实了这个预言。

图 7.15
在朗达尔－桑德鲁姆模型中短波长引力波能从膜上的源将能量携带走，导致在表观上违反能量守恒定律。

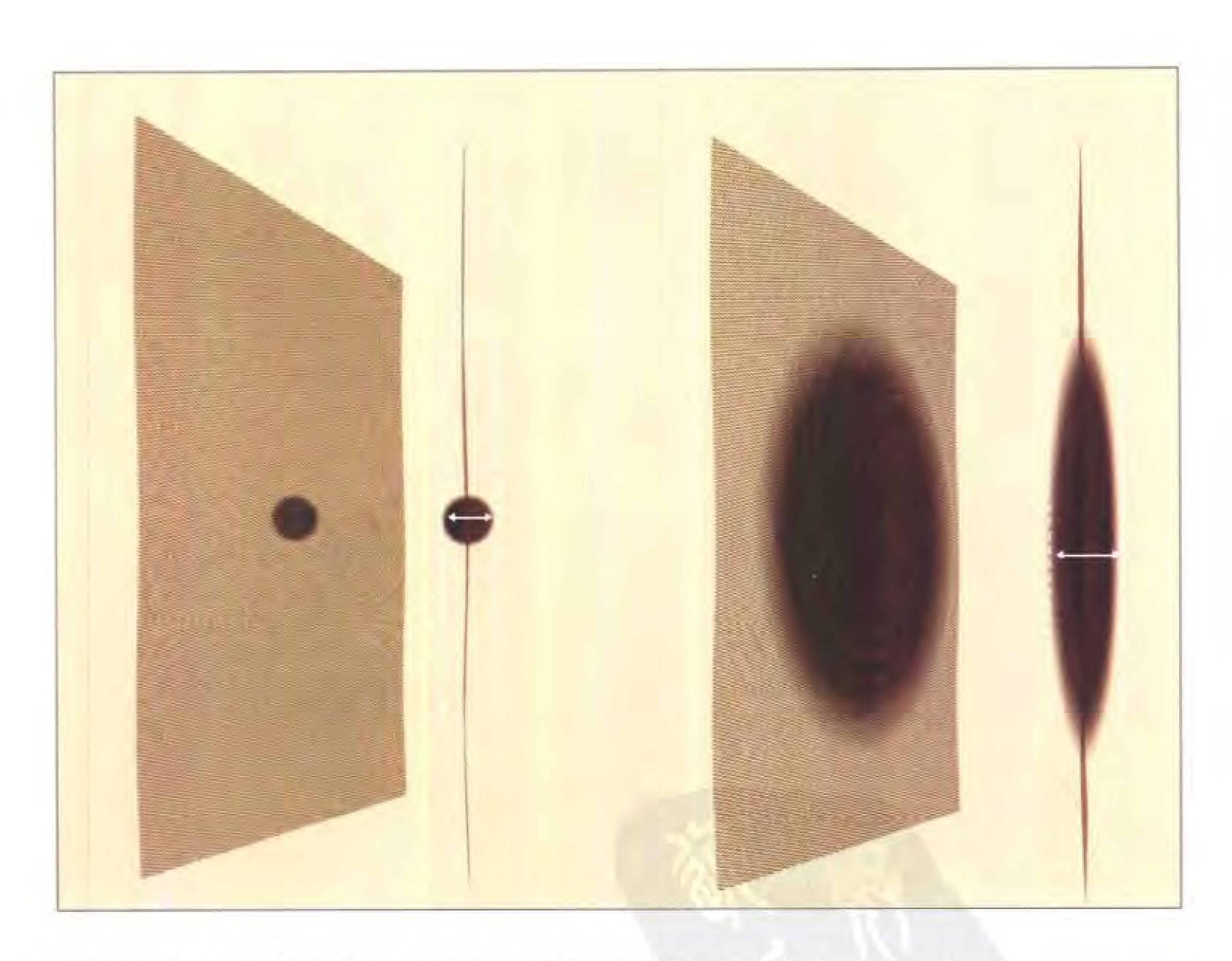
如果我们确实生活在具有额外维的时空中的一张膜上，由膜上的物体运动产生的引力波会传播进其他维去。如果还存在第二张影子膜它们就会被反射回来并且被束缚在两张膜之间。另一方面，如果只有一张单独的膜，而且额外维正如在朗达尔－桑德鲁姆模型中那样，无限地延伸出去，引力波将完全逃逸，并且从我们的膜世界携带走能量（图 7.15）。

这似乎违反了物理学中的一个基本原则：能量守恒定律。它是讲宇宙中的总能量保持常数。然而，只是因为我们的观点局限于在膜上发生的事，所以定律显得被违反了。一位可以看到额外维的天使知悉总能量并没有改变；它只不过发散得更开而已。

由两个相互公转的恒星产生的引力波具有的波长比在额外维中的马鞍形曲率的半径长得多。这意味着,波正如引力那样被局限于膜的很小邻域内，而不向额外维发散很多或者不从膜携带走很多能量。另一方面,波长比额外维被弯曲的尺度更短的引力波会很容易地从膜的邻近逃逸。

黑洞很可能是可观数量的短引力波的仅有的源。一个在膜上的黑洞会延展到在额外维中的一个黑洞去。如果该黑洞很小，它将几乎是圆的；也就是说，它向额外维延展的深度和它在膜上的尺度大致相当。另一方面,一个膜上的巨大黑洞将会延展成一个“黑饼”，它被局限于膜的邻近，而且它在额外维上的厚度比在膜上的宽度小很多(图 7.16)。

正如在第四章中解释的，量子理论意味着黑洞不是完全黑的;它们像热体一样发射所有种类的粒子和辐射。因为物质和非引力的力像电力一样被限制在膜上，所以粒子和辐射,譬如光,将会沿着膜发射。然而,黑洞还发射引力波。这些引力波不被限制在膜上,也传播到额外维中去。如果黑洞是巨大的并且是饼状的,引力波就会停留在膜附近。这表明黑洞将会以我们在四维时空中预料的速率损失能量(按照 $E=mc^2$,因此损失质量)。因此,黑洞会



慢慢蒸发并且缩小尺度，直至它变得比马鞍面形额外维的曲率半径还小为止。在这一刻由黑洞发出的引力波开始自由地逃逸到额外维中去。对于膜上的某一个人，黑洞—或者如米昂歇尔称作暗星的(见第四章)—就显得在发射暗辐射，这是一种在膜上不能直接观察到的辐射，但是其存在可由黑洞损失质量这一事实推断出。

图 7.16
在我们膜世界中的一个黑洞会延展到额外维中去。如果黑洞很小，它就几乎是球形的。但是在膜上的一个巨大黑洞会在额外维中延展成一个饼状的黑洞。

图 7.17　膜世界的形成就像在沸腾水中蒸汽泡的形成一样。

这意味着从一个蒸发着的黑洞发出的最后辐射爆显得比它的实际更不激烈些。这也许是为什么我们还未观察到能被归因于正在死亡的黑洞的伽马射线爆的原因，虽然另外一种更平淡的解释是，不存在那么多的黑洞，其质量低到使之不迟于宇宙演化的这一阶段蒸发。

从膜世界黑洞来的辐射起因于在和不在膜上的粒子的量子起伏，但是膜，正如宇宙中的任何其他东西一样，自身也遭受到量子起伏。这些起伏会使膜自发地出现和消失。膜的量子创生有点像在沸腾的水中蒸汽泡的形成。液态水由亿亿个挤在一起的 H_2O 分子组成，在最邻近的分子之间相互耦合。当水被加热上去，分子运动得更快，并且相互弹开。这些碰撞会偶然地赋予分子这么高的速度，一群分子会从它们的键中解脱出来，并且形成由水环绕着的小蒸汽泡。随着更多的分子从液体中出来加入蒸汽或者相反的过程，泡会以随机的方式长大或缩小。大多数蒸汽泡会再次坍缩成液体，但是一些将会长大到一定的临界尺度，超过这临界尺度的泡泡几乎肯定会继续长大。当水沸腾时人们看到的正是这些大的膨胀的泡泡(图 7.17)。

膜世界的行为很相似。不确定性原理允许膜世界作为泡泡从无中出现，膜形成泡泡的表面，而内部是高维空间。非常小的泡泡倾向于再坍缩成无，但是一个由于量子起伏而长大超过某一临界尺度的泡泡多半会继续长大。生活在这膜上，也就是泡泡的表面上的(像我们这样的)人，会认为宇宙正在膨胀。



这正如把星系画在气球的表面上，然后将其吹胀。星系会相互离开，但是没有任何星系可以被认定为膨胀的中心。但愿没有人持宇宙之针将泡泡放气。

根据在第三章中描述的无边界设想，膜世界的自发创生有一个在虚时间中的历史，这个历史像一个果壳：也就是说，它是一个四维球面，正如地球的表面，但是多了两维。其重要的差别是在第三章中描述的果壳根本上是空的。该四维球不是任何东西的边界，而 M－理论预言的时空其余的六或七维都被弯卷成甚至比果壳更小。然而，在这新的膜世界图像中，该果壳是充满了的：我们生活其上的膜在虚时间中的历史是一个四维球，它是一个五维泡泡的边界，而余下的五或六维被弯卷得非常小(图 7.18)。

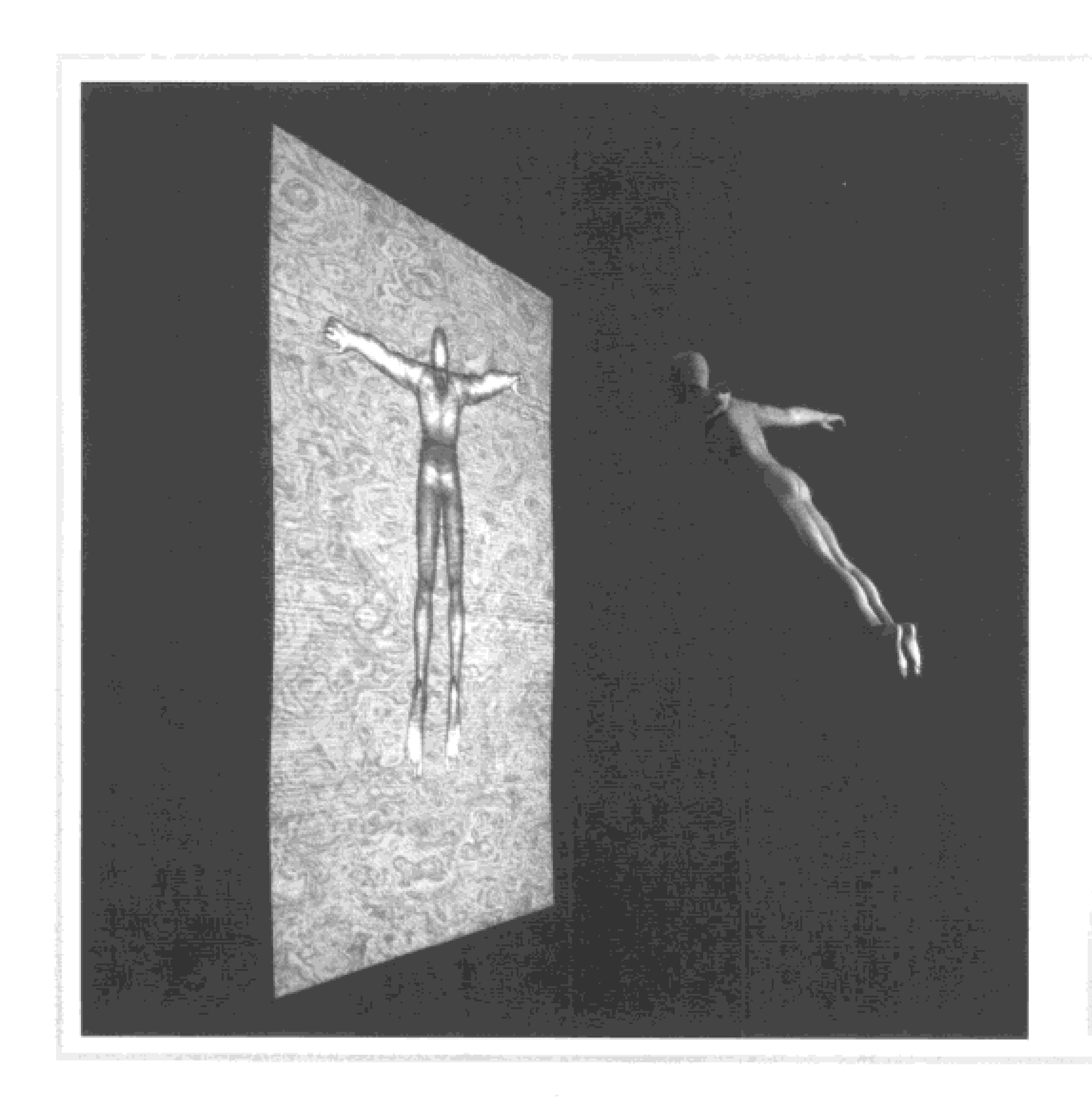
膜在虚时间中的历史确定了它在实时间中的历史。在实时间中膜以像在第三章中描写过的加速暴胀的方式膨胀。一个完全光滑的球形的果壳是泡泡在虚时间中的最可能的历史。然而，它对应于在实时间内以暴胀方式永远膨胀的膜。星系不能在这种膜中形成，这样智慧生命不会发展。另一方面，在虚时间中，不那么光滑和球形的历史具有稍低的概率，但是它能对应于膜在实时间中首先有一加速暴胀的相，然而接着开始缓慢下来的行为。在这个减速膨胀过程中，星系能够形成，而且智慧生命能够发展。这样，根据在第三章中描述的人择原理，只有稍微长毛的果壳才被诘问为何宇宙的起源不是完全光滑的智慧生命观察到。



空心球

实心球

图 7.18　宇宙起源的膜世界图像和在第三章中讨论的不同，因为稍变平坦的四维球面或者果壳不再是空心的，而且被第五维充满。

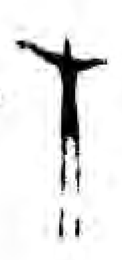


全息学

全息学把一个空间区域的信息编码到一个低一维的面上。一个黑洞的事件视界的面积是它的内部状态数的测度这一事实显示，全息原理似乎是引力的一个性质。在膜世界模型中，全息学是在我们四维世界的态和高维的态之间的一一对应。从实证主义的观点看，人们不能区分何种描述更为基本。

随着膜的膨胀，在它内部的高维空间的体积会增大。最终存在一个由我们生存其上的膜围绕着的巨大的泡泡。但是，我们真的是生活在膜上吗？根据在第二章中描述的全息学观念，关于发生在时空的一个区域内的一切的信息可以被编码在边界上。这样，也许是因为我们是发生在泡泡内部的东西在膜上的投影，所以我们自以为是生活在四维的世界中。

然而，从实证主义的观点，我们不能问什么才是实体，是膜还是泡泡？两者都是描述观测的数学模型。我们可以随意使用这两个模型哪个方便就使用哪个。膜的



外面是什么呢?存在几种可能性(图7.19):

1.外面可能没有任何东西。虽然蒸汽泡的外面是水,这只不过是帮助我们摹想宇宙起源的一个比喻。人们可以想象一个数学模型,它仅仅是一张膜以及内部的高维空间,但是外部是绝对的无,甚至连空的空间也没有。人们可以不理外面是什么而计算该数学模型所预言的东西。

2.人们可以拥有一个数学模型。在该模型中一个泡泡的外面被粘到一个类似的泡泡的外面。这个模型实质上在数学上和上面讨论的等同——在泡泡外面没有任何东西——除了在心理上的差别:人们觉得处于时空的中心比处于它的边缘更快乐。然而,对于一名实证主义者,可能性1和可能性2是相同的。

3.泡泡也许会膨胀进入一个空间,该空间不是在泡泡内部空间的镜像。这种可能性和上述讨论的两种不同,它更像沸腾的水的情形。其他的泡泡会形成并且膨胀。如果它们和我们在其中生活的泡泡碰撞并合并,其结果将会是灾难性的。甚至有人已经提出,大爆炸本身也许是由膜之间的碰撞产生的。

这些膜世界模型是研究的热门论题。虽然它们是高度猜测性的,但是它们提供的新的行为可被观测所验证。它们可以解释为何引力显得如此之弱。在基本理论中引力可以相当强,但是引力在额外维中的发散意味着引力于我们生活其上的膜中在大距离下是弱的。

其中一个后果是,普朗克长度,也就是我们可以探测而不必创生黑洞的最小距离,会比在我们四维膜上因引力的微弱性出现的大很多。最小的俄罗斯娃娃毕竟没有这么小;它很可能是未来的粒子加速器可以达到的。事实上,我们也许已经发现了这最小的娃娃,也就是基本的普朗克长度,如果美国没有在1994年忽然觉得建造SSC(超

图7.19



1.一个内部为高维空间外部是无的膜/泡



2.一种可能性是一个膜/泡的外面和另一个泡的外面粘在一起



3.一个膜/泡向不是它内部镜像的空间膨胀。在这种场景中其他泡能形成并且膨胀。

图 7.20
LEP 隧道的设计显示瑞士日内瓦的大型强子碰撞机 (LHC) 的已有的基本设施和未来的营建。

导超级碰撞机)过于昂贵，甚至在已经建造一半的情形下，取消了这个规划的话。其他的诸如在日内瓦的 LHC (大型强子碰撞机) 的粒子加速器现在正在建造。利用这些和诸如宇宙微波背景辐射的其他观测，我们也许可能确定，我们是否生活在膜上。如果这样的话，它大概是由于人择原理从 M－理论允许的大量的宇宙中挑出的膜模型。我们可以把莎士比亚《暴风雨》中的米兰达的唱段很好地释义为：

呵，膜的新奇世界，
里面有这样美妙的生灵！

那就是果壳中的宇宙。

